

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
ENGENHARIA DE PROCESSOS

Atrito de Partículas Sólidas de Cloreto de Sódio (NaCl) em
Leito Fluidizado Gasoso

Autor: Valdirene O. Platen Valdo

Orientadora: Profa. Dr^a. Katia Tannous

Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Química como
parte dos requisitos exigidos para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Química.

Campinas - São Paulo

Julho/2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

V233a Valdo, Valdirene Ondina Platen
Atrito de partículas sólidas de cloreto de sódio (NaCl)
em leito fluidizado gasoso / Valdirene Ondina Platen
Valdo--Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientador: Katia Tannous
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Resistência ao cisalhamento. 2. Leito fluidizado. 3.
Fluidização. 4. Cristais iônicos. I. Tannous, Katia. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: Attrition of solid particles of sodium chloride (NaCl) in a
gas-fluidized bed

Palavras-chave em Inglês: Mechanical attrition, Fluidized bed, Fluidization,
Sodium chloride

Área de concentração: Engenharia de Processos

Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora: Aline Carvalho da Costa, Itamar Ferreira

Data da defesa: 10/07/2008

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Attrition of Solid Particles of Sodium Chloride (NaCl) in a Gas-Fluidized Bed

Valdirene O. Platen Valdo (student) and Profa. Dr^a. Katia Tannous (supervisor)

Chemical Engineering School - FEQ, UNICAMP

ABSTRACT

The attrition of particulate solids is a problem of the industries that use a fluidized bed in part or in all of the processes, whether petrochemical or pharmaceutical. Such attrition is characterized by the involuntary rupture of particles during manipulation, processing and storage of the solids, which is evidenced by the accumulation of dust and degradation of the product. There are three types of attrition, defined as mechanical, thermal and chemical.

In this work, we studied the mechanical attrition of solid particles of Sodium Chloride (NaCl), which belong to Group D in Geldart's classification in a gas-fluidized bed. The experimental equipment used was composed by a tridimensional acrylic column of 0.092 m of internal diameter, placed next to a collection system in connection with a cyclone. The particulate matter was characterized by the particle diameters, density, porosity and sphericity, and analyzed through sieving techniques, gaseous picnometry, mercury porosimetry and the ratio between the respective diameters of the inscribed and circumscribed circles.

A complete factorial plan 2^3 was applied in order to check the influence of different variables on the attrition rate. The variables studied were: the mean particle diameter, the superficial gas velocity and the fluidization time.

The methodology applied to obtain the attrition rate was through the granulometric analysis by sieving technique, before and after the submission of particles to the adopted operational conditions. Images obtained by Scanning Electron Microscopy (SEM) have helped the characterization of attrition on the particles surface.

The experimental results showed that all the studied variables (mean particle diameter, superficial gas velocity and fluidization time) have influenced the attrition rate. A statistical model was proposed to characterize the studied process.

Keywords: Mechanical attrition, Fluidized Bed, Fluidization, Sodium Chloride.

Dedico este trabalho

Aos meus pais, Lourenço (em memória) e Ondina, que estiveram ao meu lado nos momentos mais importantes da minha vida, e ao meu marido, Clayton, pela sua compreensão, carinho e apoio durante o curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

Ao meu marido Clayton, pelo apoio incondicional.

À Prof^a Dr^a Katia Tannous, minha orientadora, pela dedicação, apoio, amizade e compreensão nos momentos difíceis, a minha eterna gratidão.

Aos colegas e amigos, em especial a Maria Helena e a Sarita, pela amizade e apoio em algumas etapas do trabalho.

Aos professores que fizeram parte da banca examinadora, pelo aceite e contribuição a este trabalho.

A todos os professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Química, que de alguma forma contribuíram para conclusão do trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

A todos que estiveram ao meu lado, e me deram forças para terminar mais essa etapa da minha vida.

“O Senhor é o meu pastor; nada me faltará.”

(Salmo 23:1)

Atrito de Partículas Sólidas de Cloreto de Sódio (NaCl) em Leito Fluidizado Gasoso

Valdirene O. Platen Valdo (aluna) e Profa. Dr^a. Katia Tannous (orientadora)

Faculdade de Engenharia Química - FEQ, UNICAMP

RESUMO

O atrito de sólidos particulados é um problema enfrentado pelas indústrias que utilizam leito fluidizado parcialmente ou na totalidade de seus processos, tais como petroquímicas e farmacêuticas. Tal atrito é caracterizado pela ruptura ou desgaste involuntário das partículas durante a manipulação, processamento e armazenamento dos sólidos, sendo este manifestado pela formação de poeira e degradação do produto. Existem três tipos de atrito, definidos como: mecânico, térmico e químico.

Neste trabalho, estudou-se o atrito mecânico de partículas sólidas de Cloreto de Sódio (NaCl), pertencentes a categoria D da classificação de Geldart em um leito fluidizado gasoso. O equipamento experimental utilizado foi composto de uma coluna de acrílico tridimensional de 0,092 m de diâmetro interno, acoplada a um sistema de coleta interligado por um ciclone. O material particulado foi caracterizado pelo diâmetro das partículas, massa específica, porosidade e esfericidade, e analisado através de técnicas de peneiramento, picnometria gasosa, porosimetria de mercúrio e a razão entre os diâmetros inscritos e circunscrito, respectivamente.

Um planejamento fatorial completo 2^3 foi aplicado com o objetivo de verificar a influência de diferentes variáveis sobre a taxa de atrito. As variáveis estudadas foram: o diâmetro médio da partícula, a velocidade superficial do gás e o tempo de fluidização.

A metodologia aplicada para a obtenção da taxa de atrito foi através da análise granulométrica pela técnica de peneiramento, antes e após a submissão das partículas às condições operacionais adotadas. Imagens obtidas pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) auxiliaram na caracterização do atrito na superfície das partículas.

Os resultados experimentais mostraram que todas as variáveis estudadas (diâmetro médio da partícula, velocidade superficial do gás e tempo de fluidização) influenciaram a taxa de atrito. Um modelo estatístico foi proposto para caracterizar o processo estudado.

Palavras chave: Atrito Mecânico, Leito Fluidizado, Fluidização, Cloreto de Sódio.

Attrition of solid particles of sodium chloride (NaCl) in a gas-fluidized bed

Valdirene O. Platen Valdo (student) and Profa. Dr^a. Katia Tannous (supervisor)

Chemical Engineering School - FEQ, UNICAMP

ABSTRACT

The attrition of particulate solids is a problem of the industries that use a fluidized bed in part or in all of the processes, whether petrochemical or pharmaceutical. Such attrition is characterized by the involuntary rupture of particles during manipulation, processing and storage of the solids, which is evidenced by the accumulation of dust and degradation of the product. There are three types of attrition, defined as mechanical, thermal and chemical.

In this work, we studied the mechanical attrition of solid particles of Sodium Chloride (NaCl), which belong to Group D in Geldart's classification in a gas-fluidized bed. The experimental equipment used was composed by a tridimensional acrylic column of 0.092 m of internal diameter, placed next to a collection system in connection with a cyclone. The particulate matter was characterized by the particle diameters, density, porosity and sphericity, and analyzed through sieving techniques, gaseous picnometry, mercury porosimetry and the ratio between the respective diameters of the inscribed and circumscribed circles.

A complete factorial plan 2^3 was applied in order to check the influence of different variables on the attrition rate. The variables studied were: the mean particle diameter, the superficial gas velocity and the fluidization time.

The methodology applied to obtain the attrition rate was through the granulometric analysis by sieving technique, before and after the submission of particles to the adopted operational conditions. Images obtained by Scanning Electron Microscopy (SEM) have helped the characterization of attrition on the particles surface.

The experimental results showed that all the studied variables (mean particle diameter, superficial gas velocity and fluidization time) have influenced the attrition rate. A statistical model was proposed to characterize the studied process.

Keywords: Mechanical attrition, Fluidized Bed, Fluidization, Sodium Chloride.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
NOMENCLATURA.....	ix
INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
1.1. Fenômeno da Fluidização.....	3
1.2. Classificação das Partículas.....	5
1.3. Atrito de Partículas Sólidas	6
1.3.1. Atrito Mecânico.....	8
1.3.2. Atrito de Cristais.....	9
1.3.3. Influência de Alguns Parâmetros sobre a Taxa de Atrito Mecânico	12
1.4. Conclusão.....	26
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
2.1. Descrição do Equipamento.....	28
2.2. Material Utilizado.....	29
2.3. Capacidade Higroscópica da Partícula	29
2.4. Caracterização das Partículas	30
2.4.1. Diâmetro Médio das Partículas	31
2.4.2. Massa Específica das Partículas	32
2.4.3. Porosidade das Partículas	32
2.4.4. Análise de Imagem - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	34

2.4.5.	Esfericidade das Partículas	36
2.4.6.	Comportamento das Partículas Utilizadas com Relação à Fluidização	37
2.5.	Metodologia Experimental	37
2.5.1.	Planejamento Experimental	38
2.5.2.	Procedimento Experimental	39
2.5.3.	Determinação da Taxa de Atrito.....	41
2.6.	Conclusão.....	42
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
3.1.	Resultados dos Ensaios do Planejamento Experimental	43
3.2.	Resultados das Taxas de Atrito e da Perda Total	44
3.3.	Análise dos Resultados Referentes à Taxa de Atrito Superior	45
3.4.	Avaliação dos Modelos Estatísticos	47
3.5.	Modelo Estatístico Adotado	48
3.6.	Resultado das Análises da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) ...	51
3.7.	Conclusão	55
CONCLUSÃO GERAL..		56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Queda de pressão no leito e seu comportamento fluidodinâmico em função da velocidade superficial do gás (Tannous, 1996)	4
Figura 1.2: Classificação das partículas segundo Geldart (1973)	6
Figura 1.3: Variáveis que afetam o atrito	7
Figura 1.4: Esquema dos processos de atrito mecânico	9
Figura 1.5: Imagens de cristas de NaCl obtidas a partir de uma sequência de 15 impactos (Zhang e Guadiri, 2002)	11
Figura 1.6: Imagens de cristais KCl obtidas a partir de uma sequência de 15 impactos (Zhang e Guadiri, 2002)	12
Figura 1.7: Imagens de cristais de MgO obtidas a partir de uma sequência de 20 impactos (Zhang e Guadiri, 2002)	12
Figura 1.8: Aparato Experimental utilizado por Duo et al. (1996).....	13
Figura 1.9: Fração de massa perdida em função do tamanho da partícula de F-cat em diferentes velocidades de impacto (Duo et al, 1996).....	14
Figura 1.10: Evolução do número de finos de sílica-alumina em função do tempo (Forsythe e Hertwig, 1949).....	15
Figura 1.11: Perda fracionária de partículas de vidro poroso em função do tempo para três velocidades de impacto (Stein et al., 1998)	16
Figura 1.12: Fração de massa perdida em função da velocidade de impacto para diferentes catalisadores e tamanhos de partículas (Duo et al., 1996).....	18
Figura 1.13: Fração de massa perdida de F-cat em função do número de impactos (Duo et al., 1996)	20
Figura 1.14: Variação da taxa de atrito em função do número de impactos para diferentes velocidades de impacto (Zhang e Guadiri, 2002).....	21

Figura 1.15: Taxa de atrito resultante das diferentes placas distribuidoras em função de diferentes massas do leito ($U_{mf} = 1,2 \text{ m/s}$; $U_{jato} = 87 \text{ m/s}$; $\bar{d}_p = 2,0 \text{ mm} - 2,36 \text{ mm}$).....	22
Figura 1.16: Taxa de atrito de partículas de vidro porosa em função da velocidade do gás no jato e o diâmetro do orifício (Stein et al., 1998).....	23
Figura 1.17: Taxa de atrito de diferentes tamanhos partículas proveniente da placa de latão com 80 orifícios ($d_{orificio} = 2 \text{ mm}$) em função da velocidade de excesso do gás (Stein et al., 1998)	24
Figura 1.18: Taxa de atrito de partículas de diferentes tamanhos proveniente da placa de latão com 80 orifícios ($d_{orificio} = 0,5 \text{ mm}$) em função da velocidade do gás (Stein et al., 1998).....	24
Figura 1.19: Taxa de atrito de partículas com diâmetro entre 2,0 mm e 2,6 mm proveniente de diferentes placas distribuidoras com multi-orificos em função da velocidade do gás (Stein et al., 1998)	25
Figura 1.20: Esquema de partículas arrastadas em um jato de gás emergente de um pequeno e um grande orifício (Stein et al., 1998).....	26
Figura 2.1: Esquema do equipamento utilizado	28
Figura 2.2: Capacidade higroscópica da partícula.....	30
Figura 2.3: Distribuição granulométrica dos três diâmetros de partículas selecionadas	31
Figura 2.4: Evolução do volume de intrusão acumulado de mercúrio em função do diâmetro dos poros.....	33
Figura 2.5: Imagens das partículas de NaCl obtidas a partir do MEV	35
Figura 2.6: Esquema do método utilizado para o cálculo da esfericidade	36
Figura 2.7: Identificação das partículas de NaCl segundo a classificação de Geldart	37
Figura 3.1: Fração mássica acumulada em função do diâmetro médio entre peneiras	44
Figura 3.2: Representação geométrica dos resultados obtidos da taxa de atrito	47
Figura 3.3: Gráfico de pareto com duas interações	49

Figura 3.4: Imagens de MEV das partículas de NaCl com $\bar{d}_p = 2870 \mu\text{m}$	52
Figura 3.5: Imagens de MEV das partículas de NaCl com $\bar{d}_p = 2030 \mu\text{m}$	53
Figura 3.6: Imagens de MEV das partículas de NaCl com $\bar{d}_p = 1420 \mu\text{m}$	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Coeficiente C e índice de potência n obtidos pela regressão das curvas fração de massa perdida em função da velocidade de impacto	19
Tabela 1.2: Características das placas distribuidoras utilizadas por Stein et al, 1998.....	22
Tabela 2. 1: Informações nutricionais retiradas do <i>site</i> da empresa Cisne.....	29
Tabela 2.2: Propriedades físicas das partículas	30
Tabela 2.3: Resultados obtidos dos testes de picnometria a gás	32
Tabela 2.4: Resultados obtidos através do porosímetro de mercúrio.....	34
Tabela 2.5: Resultados referentes à esfericidade das partículas.....	36
Tabela 2.6: Fatores e níveis do planejamento experimental.....	37
Tabela 2.7: Velocidade de transição dos diferentes regimes de fluidização	38
Tabela 2.8: Matriz do planejamento fatorial	39
Tabela 3.1: Distribuição granulométrica após a passagem pelo leito.....	43
Tabela 3.2: Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada	44
Tabela 3.3: Resultados obtidos experimentalmente para as taxas de atrito e perdas	45
Tabela 3.4: Matriz do planejamento fatorial com os resultados obtidos.....	46
Tabela 3.5: Estimativa dos efeitos para um modelo com duas interações	48
Tabela 3.6: Estimativa dos coeficientes de regressão.....	49
Tabela 3.7: Tabela ANOVA.....	50

NOMENCLATURA

C	Constante (eq. 2)	[-]
D_c	Diâmetro interno do leito	[m]
d_{or}	Diâmetro do orifício do distribuidor	[mm]
\bar{d}_p	Diâmetro médio das partículas	[μm]
E	Módulo de elasticidade	[N/m ²]
FCC	Catalisador de craqueamento catalítico	[-]
H_c	Altura da coluna	[m]
H_L	Perda total por manipulação	[%]
n	Potência (eq. 2)	[-]
M	Massa de partículas de um dado tamanho após N impactos	[kg]
M_d	Massa de NaCl que passam pela 1° peneira após a fluidização	[kg]
M_i	Massa da amostra inserida no leito	[kg]
M_m	Massa das partículas de NaCl retidas na 1° peneira após a fluidização	[kg]
N	Número de impactos	[-]
N_f	Número de fluidização	[-]
P	Probabilidade de erro	[-]
R_i	Taxa de atrito	[%]
t	Tempo de fluidização	[s]
U	Velocidade superficial do gás	[m/s]

U_{mf}	Velocidade de mínima fluidização	[m/s]
v	Velocidade de impacto	[m/s]
x_i	Fração mássica retida	[%]
W_i	Perda fracionária	[%]

Letras Gregas

ξ	Taxa de atrito	[%]
ξ^+	Taxa de atrito superior	[%]
ξ^-	Taxa de atrito inferior	[%]
ρ_p	Massa específica da partícula	[kg/m ³]
ρ_g	Massa específica do gás	[kg/m ³]
σ	Tensão de cisalhamento (Lei de Hooke)	[Pa]
μ	Deformação média	[-]

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Um dos principais problemas presente nas indústrias petroquímicas e farmacêuticas é o atrito das partículas. Este é caracterizado pela formação de poeira e degradação involuntária do material sólido durante a manipulação, processamento e armazenamento em equipamentos de processos, como: leitos fluidizados, ciclones, centrífugas e transportadores pneumáticos (Boerefijn e Ghadiri, 1996).

Em leitos fluidizados, o atrito de partículas sólidas pode ser provocado por colisões partícula-partícula e partícula-parede, produzindo finos que são elutriados alterando significativamente as condições fluidodinâmicas do sistema. A poeira produzida pode causar danos à saúde e ao meio ambiente (Ghadiri e Zhang, 2002).

Todos esses problemas acarretam na reposição constante do sólido durante o processo, aumento no tempo de operação e na adição de filtros e coletores. Isso influencia significativamente nos custos de produção (Gomide, 1983). Portanto, a compreensão do fenômeno atrito, bem como os parâmetros que o afetam, é de extrema importância industrial.

A proposta deste trabalho é analisar o atrito de um material inorgânico, em particular o Cloreto de Sódio, em diferentes condições operacionais em um leito fluidizado gasoso. O Laboratório de Tecnologia de Partículas e Processos Multifásicos da Faculdade de Engenharia Química/UNICAMP vem buscando complementar a pesquisa já existente sobre atrito mecânico de várias instituições internacionais, que enfatizam, sobretudo, a indústria petroquímica (Guedes, 2004).

Com isso, essa dissertação é dividida em três capítulos:

No primeiro capítulo, após rever os conceitos de leito fluidizado gás-sólido, apresenta-se uma análise bibliográfica referente ao atrito das partículas, salientando o atrito mecânico de cristais e a influência de alguns parâmetros operacionais como tempo de fluidização, velocidade e número de impacto, característica das partículas e placa distribuidora.

O segundo capítulo é referente à descrição do dispositivo experimental utilizado, a apresentação das propriedades físicas do material sólido e sua específica metodologia.

No terceiro capítulo, são apresentados, analisados e explorados o conjunto de resultados referentes à taxa de atrito e suas perdas. Além disso, propõe-se um modelo empírico estatístico a partir do planejamento experimental adotado, referenciando características das partículas e condições de operação.

Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo estudar o atrito mecânico de cristais iônicos de cloreto de sódio (NaCl) em um leito fluidizado gasoso, correlacionando com diferentes condições operacionais do processo.

Para alcançar o objetivo principal do trabalho, algumas etapas foram seguidas:

- Escolha, seleção e caracterização do material adequado para o trabalho;
- Funcionalidade e operacionalidade do equipamento;
- Elaboração de um planejamento experimental a fim de otimizar o número de experimentos;
- Análise e discussão dos resultados associados à proposta de um modelo estatístico.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. Fenômeno da Fluidização

O uso de equipamentos e sistemas de leito fluidizado teve início com o processo de craqueamento catalítico de naftas e outras frações de petróleo. Hoje, muitas indústrias utilizam esse tipo de leito devido às excelentes características de contato fluido-sólido.

A técnica de fluidização envolve a suspensão do sólido numa corrente ascendente de fluido, em uma velocidade suficientemente elevada para causar a flutuação e a movimentação vigorosa das partículas. A transferência de calor e massa é mais eficiente nesse tipo de processo, o que permite eliminar alguns estágios, reduzindo o custo de investimento.

Apesar das vantagens oferecidas, os leitos fluidizados também apresentam algumas desvantagens, como por exemplo, o alto consumo de energia e a agitação violenta do leito que conduz ao atrito e à perda de produtos de alto valor agregado (Gomide, 1983).

A Figura 1.1, mostra um esquema da qualidade de fluidização para um sistema composto de partículas grandes com granulometria uniforme através da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do gás.

A queda de pressão representa o equilíbrio das forças peso, empuxo e as forças resistivas sobre as partículas sólidas. Quando uma velocidade superficial é relativamente baixa, o fluido (gás) escoar através das partículas sem exercer alteração na camada sólida, permanecendo um leito imóvel, comumente chamado de leito fixo (Figura 1.1a). A linha tracejada (DF) representa um leito frouxo ou descompactado e a linha cheia (OA) representa um leito compactado. Ao menor aumento da velocidade, atinge-se o ponto A, as partículas separam-se e o leito está em estado fluidizado.

Entre a linha OA e FP tem-se uma região de estereose representativo do acréscimo de energia necessária para romper as ligações entre as partículas, em estado compactado. A partir daí, a queda de pressão diminui (F) e as partículas começam a se mover vigorosamente em diferentes direções (Kunii e Levenspiel, 1991; Grace, 1994),

denominado como leito fluidizado. A velocidade correspondente à transição entre o estado fixo e o estado fluidizado é definida como a velocidade de mínima fluidização (U_{mf}).

Com o aumento da velocidade, heterogeneidades aparecem no leito sob forma de cavidades que crescem e coalescem, caracterizando o fenômeno de bolhas (Figura 1.1b). Para uma velocidade mais elevada, o tamanho das bolhas pode atingir o diâmetro da coluna: este é o fenômeno de empistonamento (Figura 1.1c).

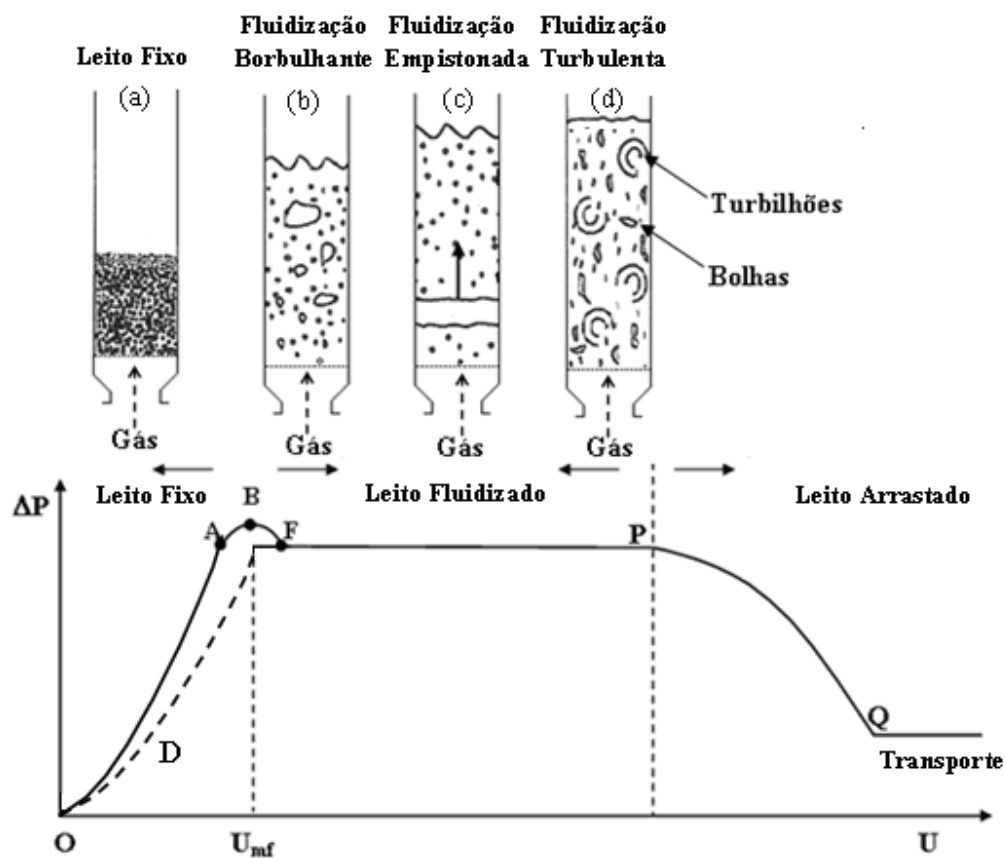


Figura 1.1: Queda de pressão no leito e seu comportamento fluidodinâmico em função da velocidade superficial do gás (Tannous, 1996)

Quando o gás atinge altas velocidades dentro do leito, ocorre a fluidização turbulenta (Figura 1.1d), caracterizada pelo desaparecimento das bolhas e o movimento caótico das partículas. Nesse ponto, é observado um aumento considerável na expansão do leito, impossibilitando a identificação da superfície. Com o aumento contínuo da velocidade superficial, a porosidade aumenta e o leito se expande. No ponto P, ocorre

arraste de sólidos (fluidização rápida) e no ponto Q, onde a porosidade é próxima de 1, ocorre o transporte de sólidos, conhecido como transporte pneumático.

1.2. Classificação das Partículas

Em 1973, Geldart caracterizou o comportamento do leito fluidizado em função das propriedades físicas das partículas sólidas em função dos diâmetros médios e da diferença entre a massa específica das partículas e do gás em condições ambientais. Segundo o autor, as partículas podem ser classificadas em quatro grupos: coesivas (C), areáveis (A), fluidizáveis (B) e jorráveis (D), como é mostrado na Figura 1.2.

O **grupo C**, é formado por partículas extremamente finas ($\bar{d}_p < 20 \mu\text{m}$) onde as forças coesivas existentes entre as partículas favorecem a aglomeração e dificultam a fluidização. A fluidização destas partículas só é possível com o uso de artifícios mecânicos como agitação mecânica, vibração ou a ampliação interna do leito. São exemplos de sólidos desta natureza os pós-faciais, o cimento, a farinha e o amido.

Fazem parte do **grupo A**, as partículas com $20 \mu\text{m} < \bar{d}_p < 100 \mu\text{m}$ e $\rho_p < 1400 \text{ kg/m}^3$. Leitos formados por partículas com essas características expandem-se antes que ocorra o borbulhamento ($U_{mb}/U_{mf} > 1$), sendo com isso facilmente fluidizáveis. São exemplos típicos desse grupo as partículas de catalisadores catalíticos.

No **grupo B**, estão classificadas as partículas com $40 \mu\text{m} < \bar{d}_p < 500 \mu\text{m}$ e $1400 \text{ kg/m}^3 < \rho_p < 4000 \text{ kg/m}^3$. Para esse grupo de partículas, as forças de interação são desprezíveis e as bolhas surgem no início da fluidização ($U_{mb}/U_{mf} = 1$). A vazão de gás necessária para fluidizar esse tipo de partícula é muito alta e a expansão do leito é pequena e uniforme. Um exemplo típico deste grupo de partículas é a areia.

As partículas pertencentes ao **grupo D** são relativamente grandes ($\bar{d}_p > 1000 \mu\text{m}$) e com alta massa específica. Leitos formados por esse tipo de partículas apresentam dificuldades para fluidizar devido à formação de grandes bolhas, sendo consideradas partículas jorráveis. São exemplos os grãos e os fármacos.

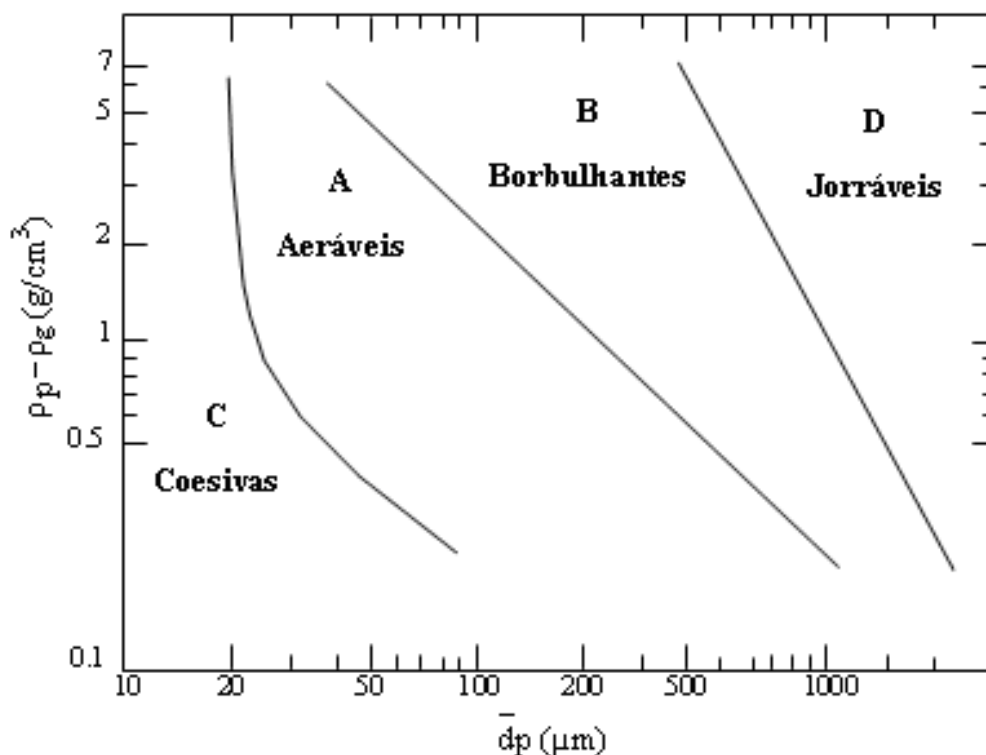


Figura 1.2: Classificação das partículas segundo Geldart (1973)

1.3. Atrito de Partículas Sólidas

O atrito é um fenômeno causado pelo contato entre corpos ou pelo meio que os movimentam. Vários mecanismos são responsáveis pelo atrito das partículas sólidas, que de uma maneira geral, podem ser amplamente classificados como fragmentação ou desgaste (Whitcombe et al., 2003).

A fragmentação é um processo onde ocorre a ruptura da partícula em diversas partes menores pela propagação de rachaduras radiais ou medianas. O desgaste ocorre apenas na superfície e pode ser subdividido em: abrasão - resultado da ação de partículas que deslizam ou rolam entre si; e erosivo - provocado por colisões entre partículas ou contra a parede do equipamento (Ghadiri e Zhang, 2002).

O atrito pode ser afetado por diversas variáveis, como mostrado na Figura 1.3 (Bemrose e Brigwater, 1987).

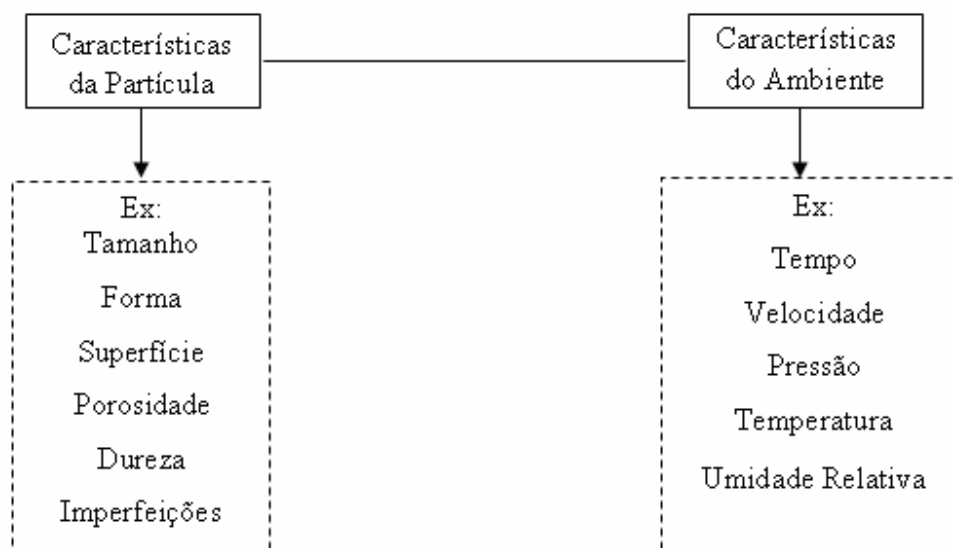


Figura 1.3: Variáveis que afetam o atrito

Praticamente todas as indústrias que manipulam material particulado, e que utilizam equipamentos como leitos fluidizados, ciclones, centrífugas ou transportadores pneumáticos, enfrentam problemas com o atrito. Dentre estas, pode-se citar alguns exemplos:

- Indústrias químicas: o atrito ocorre extensamente durante o uso de catalisadores, provocando perdas razoáveis de material ao longo do processo;
- Indústrias de cimento: a moagem de cinza causa não somente a fragmentação das partículas, mas também gera abrasão e conseqüentemente poeira que pode provocar sérios problemas ambientais;
- Indústrias farmacêuticas: muitos produtos são feitos a partir de aglomerados que podem sofrer atrito durante o processamento ou empacotamento da remessa. A liberação de poeira na atmosfera pode ser perigosa e indesejável devido ao custo elevado de muitos produtos;
- Indústrias de alimentos: as matérias-primas utilizadas geralmente possuem uma dureza moderada e uma força mecânica mais baixa se comparada às partículas inorgânicas ou poliméricas. Conseqüentemente, são mais sucessíveis ao atrito, mesmo quando o tempo de permanência destas é pequeno em equipamentos de processos (Bemrose e Brigwater, 1987).

Observa-se que o atrito pode se manifestar de diversas formas: mecânico, térmico e químico. Este trabalho dará ênfase ao atrito mecânico, em especial o que ocorre em equipamentos de leito fluidizado.

1.3.1. Atrito Mecânico

O eficiente contato gás-sólido, a boa transferência de calor entre o leito e as paredes do equipamento e a homogeneidade da temperatura são características conhecidas dos reatores de leito fluidizado. Estas propriedades benéficas estão relacionadas com a boa mobilidade das partículas durante a fluidização. Porém, o movimento das partículas causa também um grande inconveniente: o atrito mecânico (Werther e Reppenhagen, 2004).

O atrito mecânico ocorre devido à agitação da camada fluidizada, conduzindo à degradação das partículas, pelo choque entre elas e/ou contra a parede do equipamento. Como resultado, o mesmo pode provocar mudanças na distribuição do tamanho das partículas, levando à formação de finos que são elutriados alterando significativamente as condições de fluidização (Ghadiri e Zhang, 2002).

Blinichev et al. (1968) mostraram que existem dois processos de atrito mecânico (Figura 1.4):

- o processo (I) ligado ao número de fluidização $N_f < 3$ ($N_f = U/U_{mf}$), conduzindo a uma abrasão superficial progressiva das partículas até a formação de finos (C);
- o processo (II) manifesta-se sobretudo para $N_f > 3$ provocando a ruptura das partículas em vários elementos.

Os mesmos autores definem duas zonas, diferenciadas em um leito fluidizado, onde ocorre o atrito das partículas:

- zona 1, situada logo acima do distribuidor, onde o jato predominante do fluido provoca choques mecânicos violentos, levando à ruptura das partículas (processo do tipo II). As partículas produzidas (B), tendo um tamanho menor que as partículas iniciais, passam na zona superior onde são submetidas ao atrito do tipo (I);

- zona 2, localizada na parte superior do leito, onde o efeito do jato pode ser desprezado, ocorrendo apenas choques leves e a degradação das mesmas. Nesta segunda zona, observa-se o processo do tipo (I).

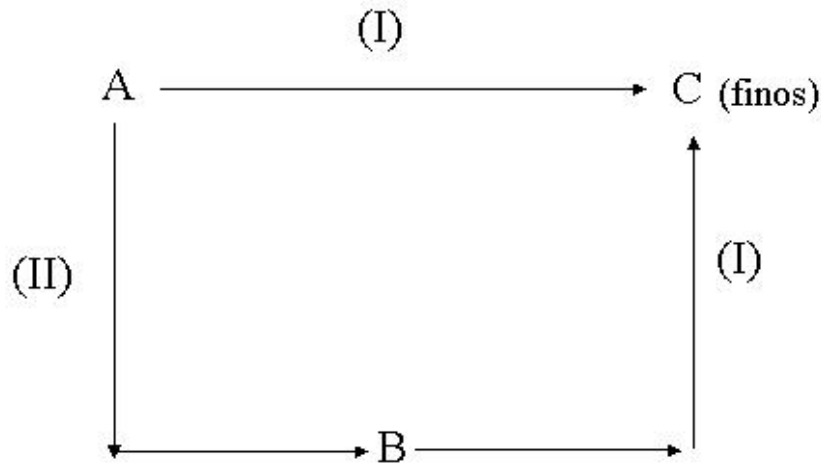


Figura 1.4: Esquema dos processos de atrito mecânico

Segundo Kalmam (1999) os parâmetros que afetam a taxa de atrito dentro do leito fluidizado podem ser divididos em duas categorias: propriedades físicas das partículas e condições operacionais do leito.

1.3.2. Atrito de Cristais

Os cristais são sólidos compostos por átomos, moléculas ou íons, organizados num padrão tridimensional bem definido, formando uma geometria específica (Wahlstrom, 1969). Suas propriedades dependem da geometria do retículo cristalino, da natureza das unidades nos pontos reticulares e das forças que as mantêm unidas. Podem ser classificados como metálicos, iônicos, covalentes ou moleculares (Russel, 1994). Este trabalho dará ênfase aos cristais iônicos.

Os cristais iônicos, como NaCl, KCl e MgO, são formados por cátions e ânions. Como uma ligação iônica é muito forte, possuem características tipicamente rígidas, porém são quebradiços. Por isso são chamados de materiais semifrágeis.

Quando um cristal iônico é submetido a uma força de atrito mecânico, ocorrem alterações físicas por deformação ou ruptura. As alterações por deformação podem ser:

- Elástica: nesta alteração o cristal recupera suas dimensões originais mediante a remoção de uma força externa. Deste modo, obedece a Lei de Hooke, sendo proporcional ao esforço aplicado, conforme mostrado na Equação (1.1) (Ferraz, 2008):

$$\sigma = \mu \cdot E \quad (1.1)$$

onde: σ = tensão aplicada (Pa);

μ = deformação elástica média (-), e

E = módulo da elasticidade ou módulo de Young (N/m²)

- Plástica: onde a deformação é permanente, ou seja, o material não retorna a sua forma inicial após a remoção da carga externa. Esta deformação aumenta a dureza do cristal. Este fenômeno é denominado endurecimento por deformação à frio ou “encruamento” (Passos, 2006).

Os principais mecanismos de ruptura sofridos pelos cristais são:

- Clivagem: o rompimento gera superfícies planas bem definidas. A clivagem depende da estrutura do cristal e ocorre paralelamente aos planos cristalinos bem definidos (Dano, 1969).
- Partição: o rompimento ocorre ao longo de superfícies lisas que não são necessariamente paralelas a planos ou faces do cristal (Wahlstrom, 1969).
- Fratura: pode ser definida como o processo de separação ou fragmentação do cristal em uma ou mais partes. Isso é devido ao rompimento das ligações em qualquer direção que não seja a da clivagem. Nos materiais semi-frágeis, como é o caso dos cristais iônicos, a fratura ocorre em decorrência da plasticidade inicial (Dubiel, 2005).

Estudos de Casos

Em 2002, Zhang e Ghadiri estudaram os efeitos da força de atrito sobre cristais de NaCl ($\rho_p = 2165 \text{ kg/m}^3$), KCl ($\rho_p = 1984 \text{ kg/m}^3$) e MgO ($\rho_p = 3580 \text{ kg/m}^3$) com diâmetro médio entre 2000 μm a 5000 μm . Os ensaios foram realizados para 5, 10, 15 e 20 impactos consecutivos a uma velocidade de 5,5 m/s. Os autores aplicaram o método do impacto

único desenvolvido por Duo et al (1996), que será descrito posteriormente no item 1.3.3.a. A morfologia dos danos provocados pelos impactos foi examinada através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Figuras 1.5, 1.6 e 1.7), onde foi possível concluir que:

- (i) A deformação plástica ocorreu nos cantos das partículas de NaCl, KCl e MgO, com vários tipos de rachaduras (Figuras 1.5a, 1.6a e 1.7a). O cristal de MgO (Figura 1.7) possui uma dureza maior e uma superfície mais resistente a impactos consecutivos, conduzindo a uma maior deformação.
- (ii) A perda de material ocorreu a partir da fragmentação dos cantos e das bordas das partículas (Figuras 1.5b, 1.6b e 1.7b).
- (iii) O tamanho e a posição das rachaduras laterais e radiais variam de canto para canto, e de partícula para partícula. As rachaduras laterais são primeiramente responsáveis pela remoção do material (Figuras 1.5b, 1.6b e 1.7b). As rachaduras radiais se propagam do canto para o corpo das partículas e, portanto, são significativas para o processo de fragmentação. Contudo, o volume de remoção do material irá depender da profundidade e comprimento de cada rachadura.

Os resultados obtidos por Zhang e Ghadiri (2002) mostraram que a extensão dos danos provocados pelo atrito depende, em parte, do tipo de rachadura e deformação sofrida pelo sólido. Outros parâmetros que influenciam o resultado da taxa de atrito são as propriedades físicas e as condições operacionais do sistema, que serão discutidas no próximo item.

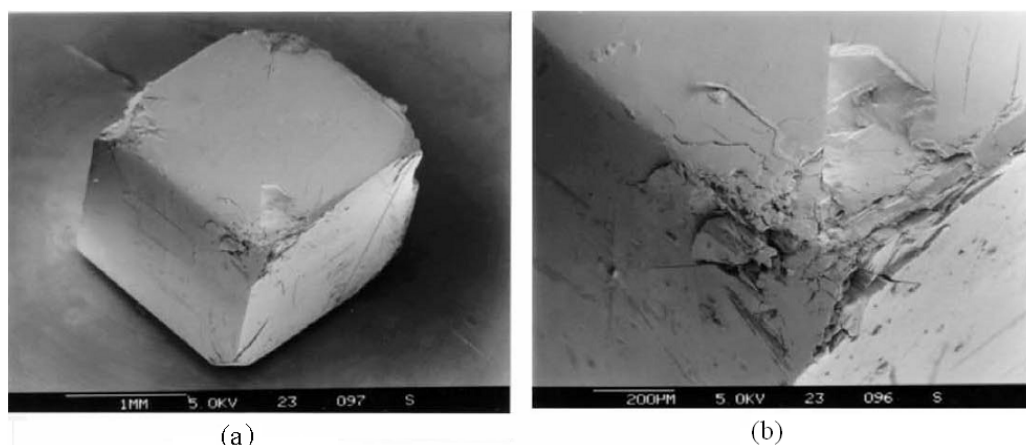


Figura 1.5: Imagens de cristas de NaCl obtidas a partir de uma sequência de 15 impactos (Zhang e Guadiri, 2002)

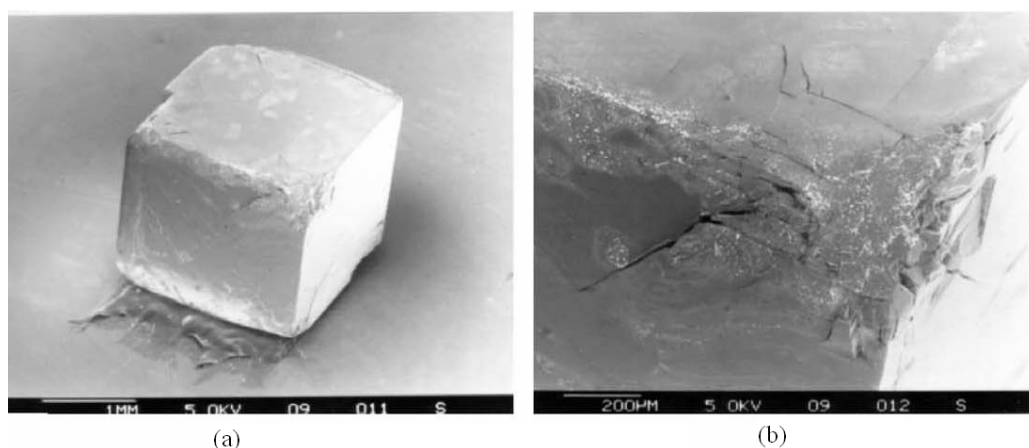


Figura 1.6: Imagens de cristais KCl obtidas a partir de uma seqüência de 15 impactos (Zhang e Guadiri, 2002)

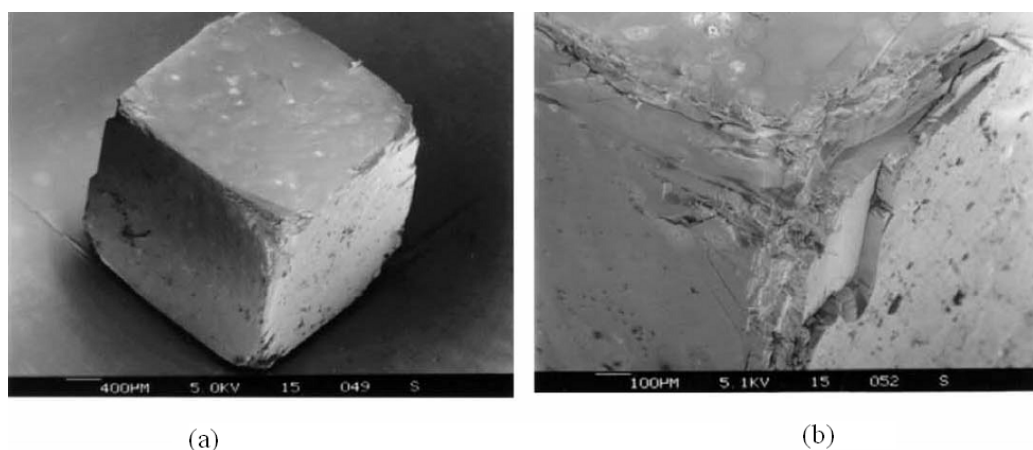


Figura 1.7: Imagens de cristais de MgO obtidas a partir de uma seqüência de 20 impactos (Zhang e Guadiri, 2002)

1.3.3. Influência de Alguns Parâmetros sobre a Taxa de Atrito Mecânico

Grande parte dos trabalhos encontrados na literatura mostra uma interligação direta entre os parâmetros fluidodinâmicos, as condições operacionais do sistema e a taxa de atrito. A seguir serão apresentados alguns estudos encontrados na literatura, ressaltando que alguns destes são restritos a estudos de pequena escala.

a. Influência do Tamanho e Massa Específica das Partículas

Duo et al. (1996) estudaram o efeito do tamanho das partículas de catalisadores (F-cat: $\bar{d}_p = 75 \mu\text{m} - 125 \mu\text{m}$; $\bar{d}_p = 90 \mu\text{m} - 106 \mu\text{m}$; $\bar{d}_p = 106 \mu\text{m} - 125 \mu\text{m}$) sobre a taxa

de atrito, utilizando o método do impacto único. Este requer uma instalação experimental especial (Figura 1.8), formada por uma guia onde as partículas atravessam um tubo edutor até atingirem uma placa horizontal rígida, onde são impactadas e coletadas. As velocidades das partículas e o tempo, antes e após o impacto, foram medidos através de fotodiodos e laser.

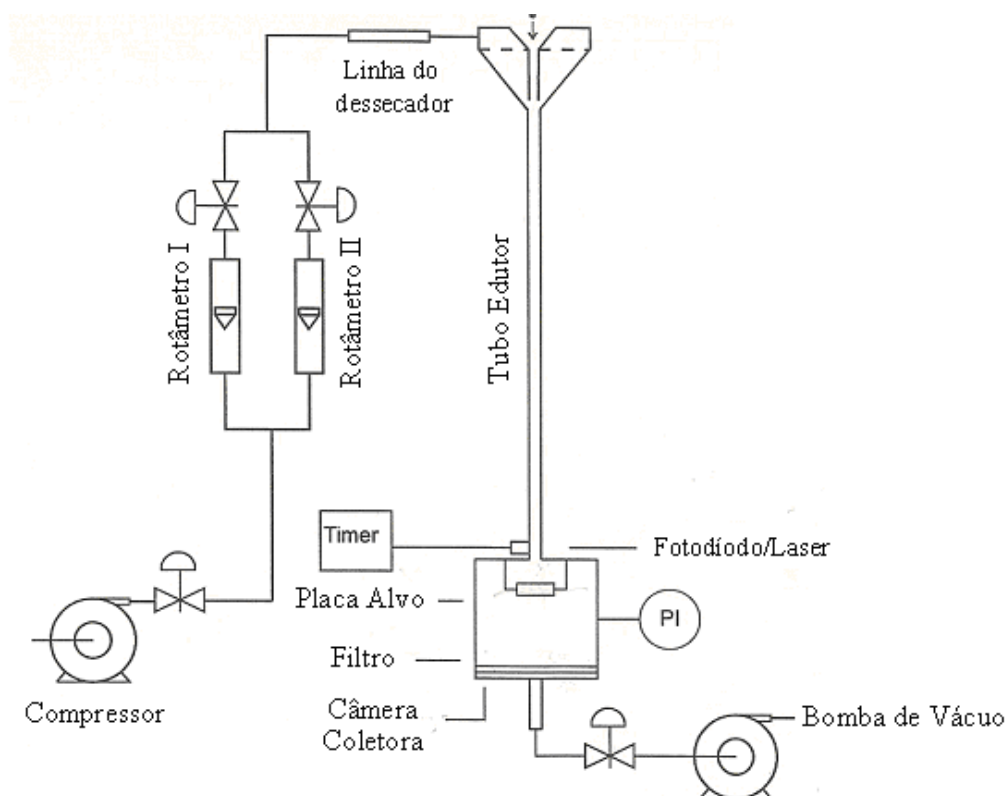


Figura 1.8: Aparato Experimental utilizado por Duo et al. (1996)

Os autores observaram um aumento linear entre a perda fracionária e o tamanho da partícula (Figura 1.9) para diferentes velocidades de impacto. Para estes, esse aumento pode ser atribuído a uma energia mais elevada de impacto e a forma irregular das partículas, com saliências e arestas significativas a superfície.

Zhang e Ghadiri (2002) também estudaram o efeito do tamanho da partícula sobre a taxa de atrito utilizando partículas de NaCl ($\rho_p = 2165 \text{ kg/m}^3$), KCl ($\rho_p = 1984 \text{ kg/m}^3$) e MgO ($\rho_p = 3580 \text{ kg/m}^3$) com diâmetro médio entre 2000 μm a 5000 μm utilizando o mesmo método e equipamento utilizado por Duo et al (1996). Há uma concordância entre

autores com relação à dependência linear e crescente entre a taxa de atrito e o tamanho da partícula, mesmo sendo para materiais distintos.

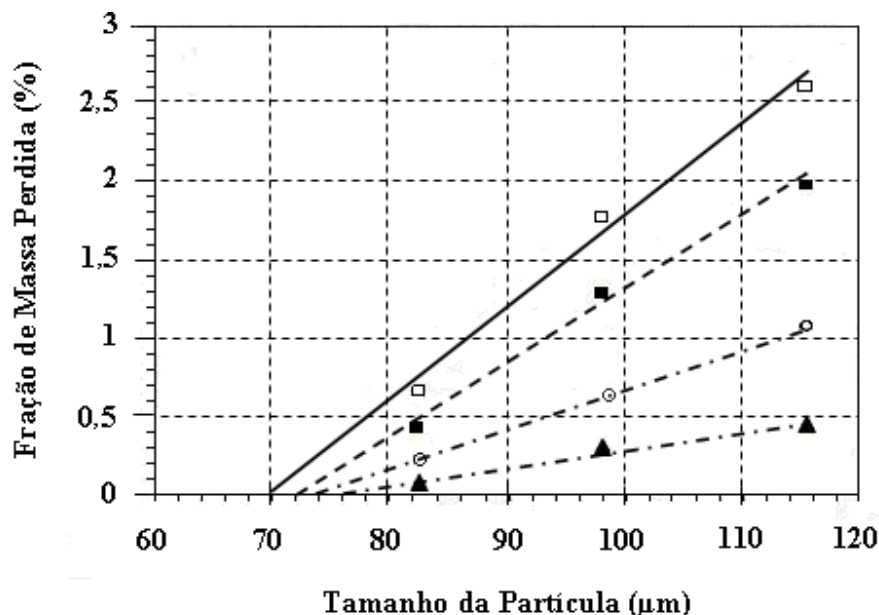


Figura 1.9: Fração de massa perdida em função do tamanho da partícula de F-cat em diferentes velocidades de impacto (Duo et al, 1996)

* Velocidades: ▲ = 14,7 m/s; ○ = 23,4 m/s; ■ = 33,10 m/s; □ = 40,50 m/s

b. Influência do Tempo de Fluidização

Forsythe e Hertwig (1949) foram os pioneiros a estudar o fenômeno do atrito em um leito fluidizado, onde desenvolveram um método para avaliar a resistência das partículas. O método prescreve que uma amostra de 50g de catalisador comercial (sílica-alumina, sílica-magnésia e catalisador de craqueamento catalítico-FCC) esteja sujeita a um jato proveniente de um único orifício com 0,40 mm de diâmetro em um leito cilíndrico, operando a uma velocidade superficial do gás de 0,25 m/s durante uma hora. A mudança na distribuição do tamanho das partículas do catalisador é determinada através do método do peneiramento baseado na série de Tyler.

Após análise dos resultados, os autores concluíram que a variação da taxa de atrito diminui com o tempo (Figura 1.10). Segundo eles, isso ocorre devido ao aumento na resistência ao atrito das partículas, provocado pelo desgaste das extremidades salientes do catalisador e pela eliminação das partículas mais frágeis. O aumento na quantidade de finos

durante o teste causa um efeito de amortização das partículas, que limita a força de impacto durante as colisões entre partículas maiores diminuindo assim, a variação da taxa de atrito.

O método de Forsythe e Hertwig (1949) foi adotado como padrão industrial para avaliar o atrito de partículas de vários materiais, como FCC e perborato de sódio.

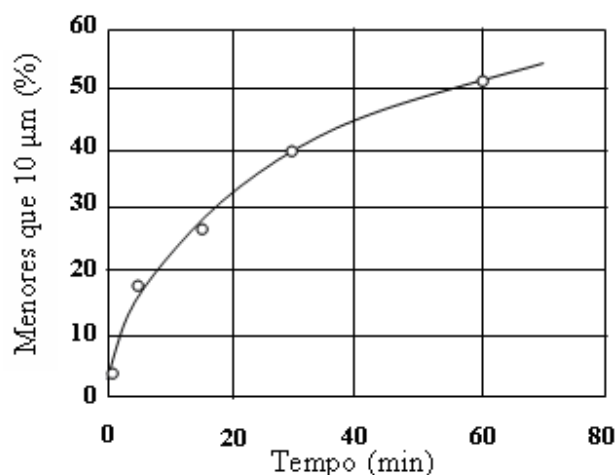


Figura 1.10: Evolução do número de finos de sílica-alumina em função do tempo (Forsythe e Hertwig, 1949)

Boerefijn e Guadiri (1996) analisaram o teste de Forsythe e Hertwig (F&H), utilizando partículas de FCC ($\bar{d}_p = 90 \mu\text{m}$, $\rho_p = 850 \text{ kg/m}^3$) em um leito fluidizado de 1,50 m de altura e 0,125 m de diâmetro e concluíram que o mesmo deve ser aplicado com cuidado para avaliar a resistência das partículas em processos industriais. Segundo os autores, durante a fluidização, as partículas aumentam sua angularidade, devido às colisões partícula-partícula resultando em uma taxa de atrito inicialmente elevada, porém diminuindo rapidamente, e chegando ao equilíbrio após algumas horas. A duração do teste de F&H é de uma hora, considerado um tempo muito curto para o ciclo de vida do FCC em uma operação industrial. Geralmente, a vida útil de um catalisador FCC é de três anos.

Stein et al. (1998) estudaram a influência da variável tempo com partículas de vidro poroso ($\bar{d}_p = 2000 \mu\text{m} - 2360 \mu\text{m}$; $\rho_p = 320 \text{ kg/m}^3 - 420 \text{ kg/m}^3$) em um leito com 0,70 m de diâmetro e distribuidores de placa porosa, placa com um único orifício e placa

com multi-orifícios, para três diferentes velocidades do gás, sendo estas 0,412 m/s, 0,483 m/s e 0,512 m/s.

De acordo com os autores, apenas as frações de partículas com maior diâmetro médio, combinado com distribuidor de placa porosa, apresentaram uma taxa de atrito dependente do tempo. A Figura 1.11 apresenta a fração de massa perdida em função do tempo, onde é possível verificar que para a velocidade mais baixa ($U = 0,412\text{m/s}$), a taxa de atrito atingiu um estado estacionário após duas horas de fluidização, enquanto que as velocidades maiores, 0,483 m/s e 0,512 m/s mudam sua tendência após os tempos de 1h e 10 min e, 35 min, respectivamente. No entanto, esta mudança não garante o equilíbrio das partículas.

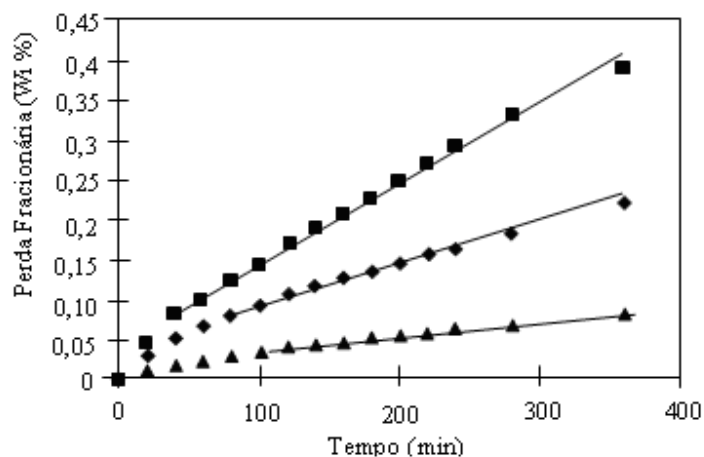


Figura 1.11: Perda fracionária de partículas de vidro poroso em função do tempo para três velocidades de impacto (Stein et al., 1998)

* Velocidade : ▲ = 0,412 m/s; ◆ = 0,483 m/s; ■ = 0,512 m/s

c. Influência da Velocidade de Impacto e Velocidade Superficial do Gás

Ghadiri e Boerefijn (1996) compararam os efeitos da velocidade de impacto da partícula sob um alvo rígido e da velocidade superficial do gás em um leito fluidizado sobre a taxa de atrito. Os testes foram realizados com partículas de NaCl ($\bar{d}_p = 18 \mu\text{m}$, $\rho_p = 2180 \text{ kg/m}^3$) e FCC ($\bar{d}_p = 160 \mu\text{m}$, $\rho_p = 1500 \text{ kg/m}^3$).

Na primeira etapa do trabalho, os autores utilizaram o equipamento aplicado para um impacto único (descrito no item 1.3.3.a) avaliando a velocidade de impacto (0,50 m/s –

55 m/s). Na segunda etapa, um leito fluidizado cilíndrico de acrílico ($D_c = 0,058$ m e $H_c = 0,9$ m) com três distribuidores de placas perfuradas diferentes, com 73, 110, e 175 furos com 1 mm de diâmetro, com uma variação da velocidade superficial de 25 m/s a 125 m/s, permitiu avaliar o efeito da velocidade superficial do gás sobre a taxa de atrito.

A taxa de atrito foi determinada para os dois sistemas através da Equação (1.2):

$$R_i = \frac{M_{\text{Produto Final}}}{M_{\text{Partícula Inicial}}} \quad (1.2)$$

em que,

$M_{\text{Produto Final}}$ é a massa do produto com diâmetro inferior à partícula inicial, e $M_{\text{Partícula Inicial}}$ é a massa da partícula antes dos testes.

Em ambos os casos, os autores observaram que a taxa de atrito aumentou com as velocidades e que a dependência dos danos provocados pelo impacto entre partículas em um leito fluidizado segue a mesma tendência dos danos provocados pelo impacto de uma partícula em um alvo rígido. Este último procedimento pode fornecer danos mais extensivos, porém o efeito da velocidade de impacto não se mostrou diferente daquele ocorrido com a velocidade superficial do gás.

Geralmente, a frequência de colisões partícula-partícula em um leito fluidizado é mais elevada. Gravações de vídeo, com alta velocidade de captação de imagem, mostraram que as partículas de NaCl aceleram ao longo da linha central do jato, impactadas na fase densa do leito. Entretanto, a velocidade da maioria das partículas é dissipada durante o primeiro impacto, e as colisões subsequentes ocorrem em uma velocidade similar à velocidade de recirculação das partículas no jato. O processo real do atrito será contido na primeira colisão partícula-partícula e a similaridade entre o impacto único e o impacto entre partículas dentro do leito serão preservadas.

Na mesma linha de trabalho, Duo et al. (1996) buscaram analisar a dependência da taxa de atrito com a velocidade de impacto utilizando partículas de catalisador fresco (F-cat, $\bar{d}_p = 63 \mu\text{m} - 125 \mu\text{m}$) e catalisador de equilíbrio (E-cat, $\bar{d}_p = 75 \mu\text{m} - 125 \mu\text{m}$).

Os autores concluíram que:

- i) a perda fracionária, e conseqüentemente a taxa de atrito, aumenta exponencialmente com a velocidade de impacto para ambos os tipos de material e tamanhos de partículas diferentes;
- ii) a dependência da taxa de atrito com a velocidade de impacto (v) pode ser descrita pela lei da potência (Equação 1.3) onde os índices constantes n e C podem ser obtidos por análise da regressão da curva fração de massa perdida em função da velocidade de impacto (Fíguas 1.12a e 1.12b);

$$\xi = C v^n \quad (1.3)$$

- iii) os índices de potência (n) relativos à taxa de atrito e à velocidade de impacto, estão em todos os casos próximos a 2 (Tabela 1.1). Apesar de possíveis diferenças nos mecanismos de ruptura, a semelhança nos valores deve-se ao fato de que a ruptura é proporcional à energia incidente da partícula sobre o impacto, e portanto deve ser escalar com o quadrado da velocidade de impacto (v).

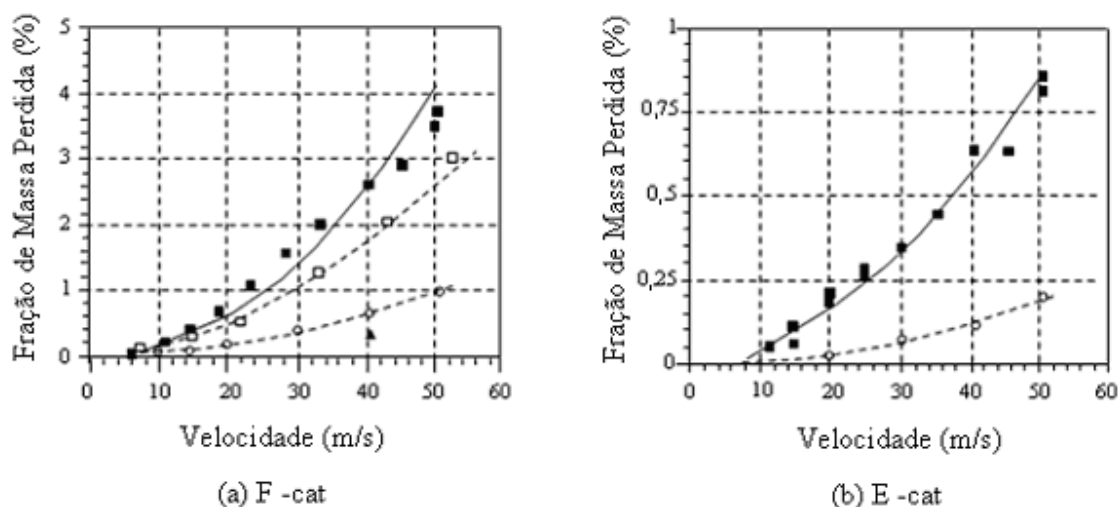


Figura 1.12: Fração de massa perdida em função da velocidade de impacto para diferentes catalisadores e tamanhos de partículas (Duo et al., 1996)

* Tamanho da Partícula: ▲ = 63 – 75 μm ; ○ = 75 – 90 μm ; □ = 90 – 106 μm ; ■ = 106 – 125 μm

Na figura 1.12a observa-se, ainda, que a fração de massa perdida para partículas de F-cat entre 63 μm e 75 μm é muito pequena, sendo representada por um único ponto tornando impossível a obtenção dos índices das constantes n e C por análise de regressão da curva.

Em complementar ao trabalho de Duo et al (1996), Zhang e Ghadiri (2002) avaliaram a influência da velocidade de impacto utilizando partículas de MgO, NaCl e KCl com diâmetro médio de 2000 μm . Os autores concluíram que o índice de potência (n) está associado ao número de impactos sofrido pela partícula. Em altas velocidades de impacto, as partículas submetem-se a uma alta taxa de endurecimento por deformação, fazendo com que o índice n permaneça próximo de 2 apenas nos primeiros impactos.

Tabela 1.1: Coeficiente C e índice de potência n obtidos pela regressão das curvas fração de massa perdida em função da velocidade de impacto

Material	Faixa de Tamanho do Catalisador (μm)	C	n
F-cat	75 - 90	5×10^{-4}	1,93
F-cat	90 - 106	$2,4 \times 10^{-3}$	1,79
F-cat	106 - 125	$1,3 \times 10^{-3}$	2,06
E-cat	75 - 90	$7,0 \times 10^{-5}$	2,03
E-cat	106 - 125	$8,0 \times 10^{-4}$	1,79

d. Influência do Número de Impactos

Duo et al. (1996) avaliaram este efeito utilizando partículas de F-cat ($\bar{d}_p = 106 \mu\text{m}$ - 125 μm) a uma velocidade de 15 m/s. Os resultados (Figura 1.13) mostraram que o atrito diminui gradualmente com o aumento do número de impactos. Segundo os autores, uma partícula de catalisador sofre numerosas colisões durante sua vida útil em uma unidade de FCC e a taxa de atrito instantânea pode depender do histórico do impacto.

Zhang e Guadiri (2002) determinaram a perda fracionária por impacto de cristais de NaCl, KCl e MgO ($d_p = 2000 \mu\text{m}$) para diferentes velocidades de impacto, após ciclos de cinco impactos consecutivos, como mostra a Equação (1.4):

$$\xi_{0,N} = \frac{1}{5} \frac{M(N) - M(N+5)}{M(N)} \quad (1.4)$$

onde, M é a massa da partícula de um dado tamanho após N impactos.

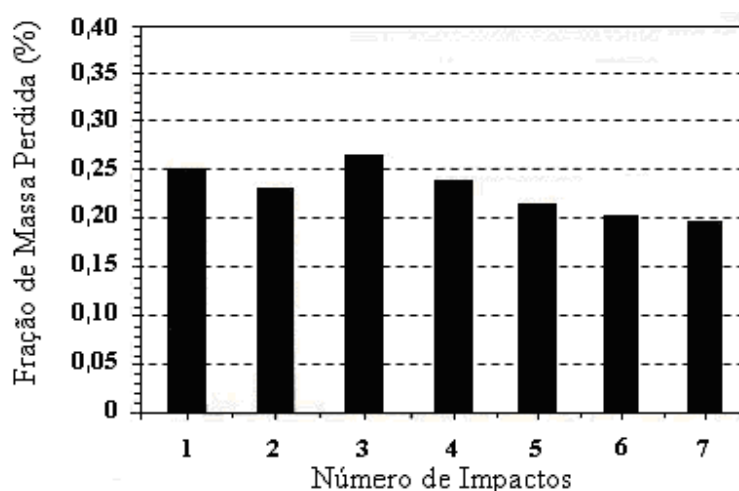


Figura 1.13: Fração de massa perdida de F-cat em função do número de impactos (Duo et al., 1996)

Para cada teste, foram impactadas de 20 a 50 partículas em um alvo rígido, em duas velocidades diferentes (5,5 e 8,4 m/s) e uma correspondente à velocidade de queda livre das partículas (4,3 m/s para KCl e NaCl; 4,5 m/s para MgO). Ao final de cada ciclo de impactos, as partículas foram coletadas em uma bandeja de vidro, a fim de reduzir os efeitos eletrostáticos, e estas transferidas para uma bandeja de alumínio, dando maior precisão às massas. Segundo os autores, a perda de material é muito pequena para ciclos de cinco (5) impactos, chegando a alguns casos ser menor que 1 mg. Nesta escala de massa, as circunstâncias ambientais, como a vibração do assoalho e a umidade do ar podem influenciar os resultados. Portanto, para aumentar a exatidão da massa, a maioria dos testes foi realizada durante a noite ou em fins de semana, onde a temperatura do laboratório ficou entre 23°C e 24°C e a umidade relativa em torno de 40 % a 50 %.

As Figuras 1.14a, 1.14b e 1.14c mostram os ensaios realizados para os três materiais, NaCl, KCl e MgO, onde observa-se o aumento da taxa de atrito com o número de impactos para diferentes velocidades de impacto (U_i).

O efeito do número de impacto foi mais significativo para as partículas de KCl e NaCl com 15 impactos e velocidades de 8,4 m/s. Segundo os autores, isso ocorreu devido a característica de “encruamento” dos cristais, quando submetidos a impactos repetitivos (descrito no item 1.3.2). Os ensaios realizados com 20 impactos não foram apresentados, devido a uma propagação de rachaduras produzindo uma fragmentação significativa, inviabilizando a convalidação do modelo proposto pelos autores.

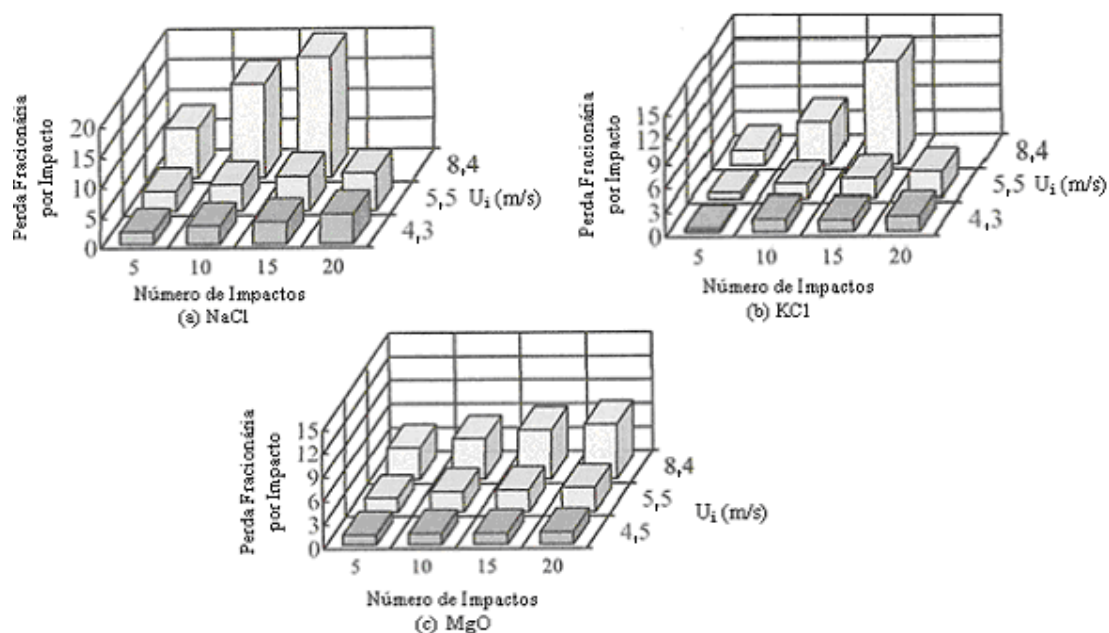


Figura 1.14: Variação da taxa de atrito em função do número de impactos para diferentes velocidades de impacto (Zhang e Guadiri, 2002)

e. Influência da Placa Distribuidora

Stein et al. (1998), com o objetivo de avaliar a influência de placas distribuidoras sobre a taxa de atrito, utilizaram uma coluna cilíndrica de acrílico, com diâmetro interno de 70 mm e vários tipos de placas distribuidoras (Tabela 1.2). O material sólido utilizado nos ensaios foram partículas de vidro poroso ($\bar{d}_p = 2000 \mu\text{m} - 2360 \mu\text{m}$; $\rho_p = 320 \text{ kg/m}^3 - 420 \text{ kg/m}^3$).

A primeira parte do trabalho foi avaliar a influência de placas porosas com e sem orifício no centro ($d_{\text{orifício}} = 1 \text{ mm}$). A velocidade do gás emergente do distribuidor de placa porosa foi mantida em $1,2 U_{mf}$ e a velocidade de saída do gás no jato variou entre 87 m/s e 166 m/s (Figura 1.15).

Com a placa porosa com um orifício central, a taxa de atrito (R_{jato}) não aumentou significativamente com a massa do leito. Usando o distribuidor de placa porosa sem orifício, os resultados mostraram que a taxa de atrito ($R_{\text{Placa Porosa}}$) aumenta linearmente com a massa do leito. Apesar dessa observação feita pelos autores, essa última não condiz com a curva exponencial representada na Figura 1.15.

Tabela 1.2: Características das placas distribuidoras utilizadas por Stein et al, 1998

Material	Tipo	Diâmetro (mm)	$d_{\text{orifício}}$ (mm)	Nº de orifícios
Plástico Sólido	Único orifício	50	1,50	1
Latão sinterizado	Único orifício	50	1,25	1
Latão sinterizado	Único orifício	70	1,00	1
Latão sinterizado	Único orifício	70	2,50	1
Latão	Multi-orifícios	70	0,5 e 2,0	80
Polietileno	Porosa	70	N/A	N/A
Aço	Multi-orifícios	141	1,1	80
Aço	Multi-orifícios	141	1,55 e 7,5	135
Polietileno	Porosa	141	N/A	N/A

* N/A = não se aplica

As taxas de atrito geradas com placas porosas são geralmente apresentadas pela quantidade total de material na coluna. No caso do distribuidor com um orifício, o montante total do material é irrelevante se o nível de preenchimento for suficientemente elevado para manter o jato de gás totalmente submerso.

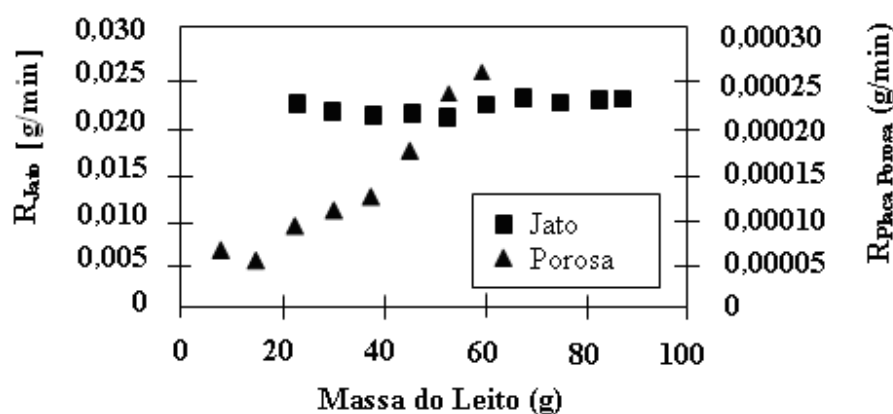


Figura 1.15: Taxa de atrito resultante das diferentes placas distribuidoras em função de diferentes massas do leito ($U_{mf} = 1,2$ m/s; $U_{jato} = 87$ m/s; $\bar{d}_p = 2,0$ mm – 2,36 mm) (Stein et al.,1998)

Na segunda parte do trabalho, os autores avaliaram a influência das placas com um único orifício de latão sinterizado com diâmetro de 1,0 mm e 2,5 mm. As experiências realizadas com placas de um único orifício foram aplicadas para estabelecer a relação entre o diâmetro do orifício e a velocidade do gás no jato. A velocidade de fluidização na base

do leito foi mantida constante ($U = 1,2 \text{ m/s}$), e a velocidade de saída do gás no orifício foi variou entre $0,02 \text{ m}^2/\text{s}$ e $0,18 \text{ m}^2/\text{s}$. A Figura 1.16 mostra a taxa de atrito traçada em uma escala logarítmica em função do produto da velocidade do gás do jato e o diâmetro do orifício. Os resultados mostrados no gráfico sugerem uma relação exponencial entre a taxa de atrito e a velocidade do gás no jato.

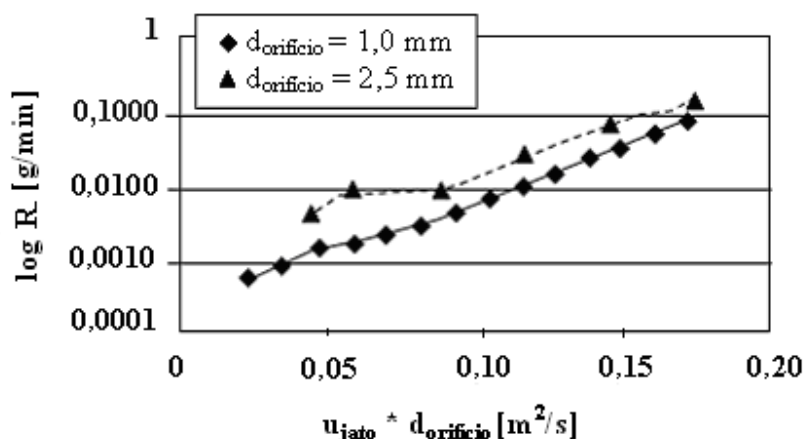


Figura 1.16: Taxa de atrito de partículas de vidro porosa em função da velocidade do gás no jato e o diâmetro do orifício (Stein et al., 1998)

A última etapa do trabalho consistiu em avaliar o efeito de placas distribuidoras com multi-orifícios de latão ($d_{\text{orificio}} = 0,5 \text{ mm}$ e $2,0 \text{ mm}$) e aço ($d_{\text{orificio}} = 1,1 \text{ mm}$; $1,55 \text{ mm}$ e $7,5 \text{ mm}$) com 80 e 135 orifícios sobre a taxa de atrito, respectivamente. Os resultados estão apresentados nas Figuras 1.17, 1.18 e 1.19.

O aspecto mais importante destes dados é a dependência na relação do diâmetro de partícula e diâmetro de orifício. Para valores comparativamente pequenos ($\bar{d}_p/d_{\text{or}} < 1$) apresentados na Figura 1.17, a taxa de atrito é aproximadamente proporcional à velocidade de excesso do gás.

Em valores em que esta razão de \bar{d}_p/d_{or} for acima de 2 (Figura 1.18), a taxa de atrito é muito mais elevada e um comportamento não-linear é observado. Esta Figura mostra que a taxa de atrito de partículas menores ($\bar{d}_p = 0,7\text{mm}-1,0\text{mm}$), para um diâmetro de orifício de $0,5 \text{ mm}$, é menor do que para as partículas maiores. Esta tendência não é observada na literatura (Ray et al, 1987). De uma maneira geral, a taxa mássica de atrito

das partículas pequenas, para um dado tamanho de orifício, é maior do que para as partículas maiores, devido à taxa de arraste e a velocidade máxima atingida pelo jato, através das partículas arrastadas, serem maiores.

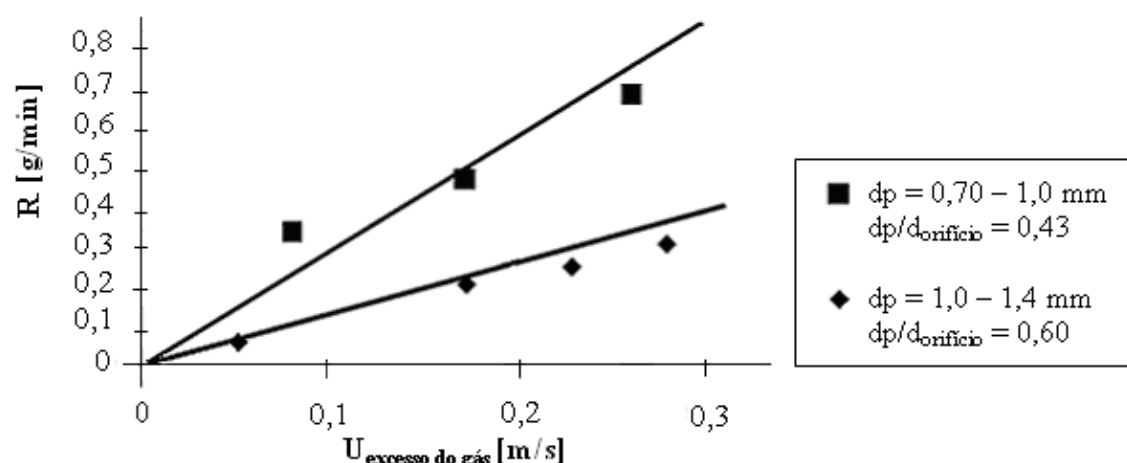


Figura 1.17: Taxa de atrito de diferentes tamanhos partículas proveniente da placa de latão com 80 orifícios ($d_{\text{orifício}} = 2$ mm) em função da velocidade de excesso do gás (Stein et al., 1998)

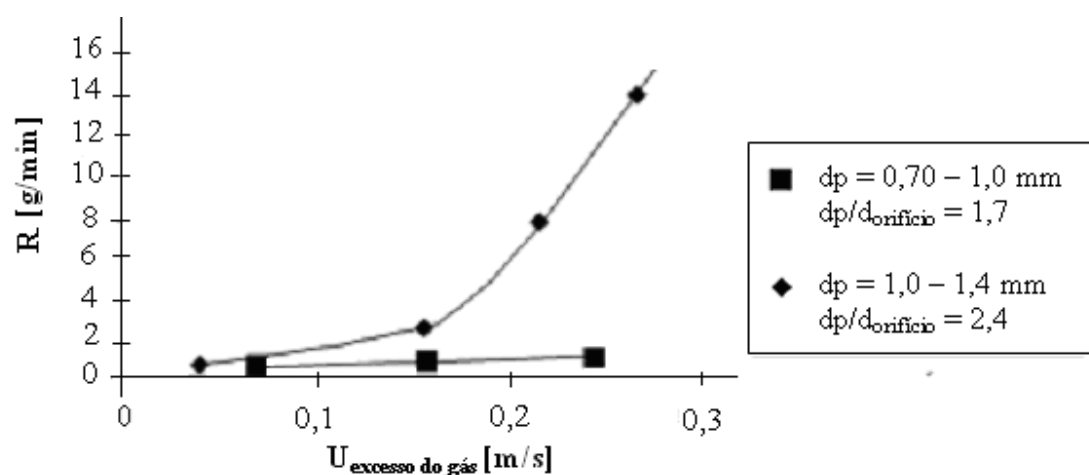


Figura 1.18: Taxa de atrito de partículas de diferentes tamanhos proveniente da placa de latão com 80 orifícios ($d_{\text{orifício}} = 0,5$ mm) em função da velocidade do gás (Stein et al., 1998)

Com o objetivo de entender os resultados citados acima, os autores testaram uma faixa maior de tamanho de partícula ($2,0 \text{ mm} < \bar{d}_p < 2,6 \text{ mm}$) para novos diâmetros do orifício, utilizando duas placas com multi-orifícios: uma de aço ($d_{\text{orifício}} = 1,1$ mm) com 80

orifícios e outra de latão ($d_{\text{orifício}} = 1,55 \text{ mm}$) com 135 orifícios. A Figura 1.19 ilustra o resultado. A placa distribuidora de aço mostra novamente (Figura 1.17) uma taxa de atrito elevada e comportamento não linear, quando a relação de diâmetro de partícula e diâmetro de orifício igual a 2.

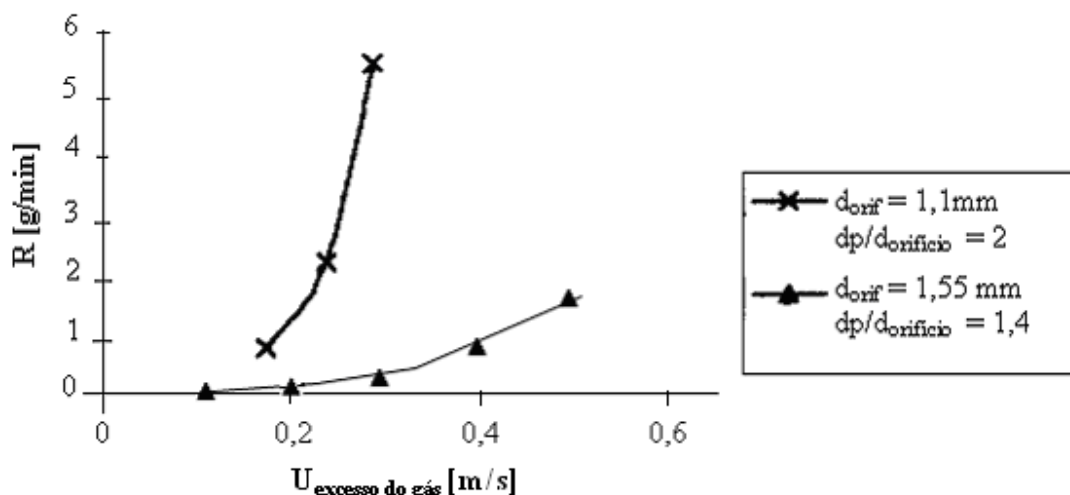


Figura 1.19: Taxa de atrito de partículas com diâmetro entre 2,0 mm e 2,6 mm proveniente de diferentes placas distribuidoras com multi-orifícios em função da velocidade do gás (Stein et al., 1998)

Segundo os autores, para partículas pequenas e com um orifício relativamente grande, o núcleo do jato é praticamente livre de partículas e o contato entre as mesmas arrastadas é limitado. Com partículas maiores, da mesma ordem de grandeza, que o diâmetro do orifício, o núcleo torna-se mais denso, e a aceleração das partículas é reduzida provocando um número maior de contato entre elas. Além disso, as partículas arrastadas pelo jato são mais susceptíveis ao contato com as partículas que entram no jato em outras direções (Figura 1.20).

Após análise dos resultados, os autores concluíram que o atrito resultante de uma placa distribuidora de gás com multi-orifício foi superior à de um distribuidor de placa porosa. Para placas com multi-orifícios, a taxa de atrito mostrou-se em alguns casos proporcional à velocidade de excesso do gás, mas em outro, particularmente onde a relação do diâmetro de partícula/diâmetro de orifício é aproximadamente 2, a mesma aumentou

com aumento da velocidade do gás. Para os autores, a razão \bar{d}_p/d_{or} próxima a este valor deve ser evitada para minimizar o atrito.

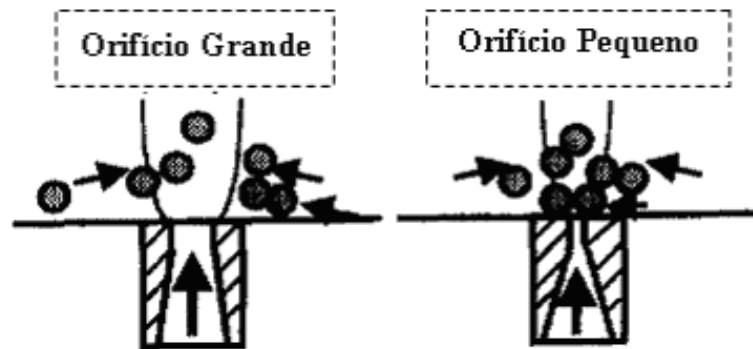


Figura 1.20: Esquema de partículas arrastadas em um jato de gás emergente de um pequeno e um grande orifício (Stein et al., 1998)

1.4. Conclusão

A revisão bibliográfica sobre o processo de atrito em leito fluidizado forneceu uma boa contribuição para esta pesquisa e auxiliou no desenvolvimento do trabalho.

Dos trabalhos pesquisados, na grande maioria, os autores recorrem ao método do impacto único proposto por Duo et al (1996) para avaliação e entendimento do fenômeno do atrito das partículas.

Poucos utilizaram leitos fluidizados tradicionais relacionando a taxa de atrito com condições operacionais do sistema e propriedades físicas das partículas. No entanto, foi possível concluir que:

- a taxa de atrito aumenta linearmente com o diâmetro das partículas independente do tipo de sólido;
- o grande número de colisões entre partículas durante a fluidização, provoca o desgaste das extremidades salientes deixando as partículas mais resistentes ao atrito. Este fenômeno resulta numa taxa de atrito inicialmente elevada, que tende a diminuir rapidamente, atingindo o equilíbrio após algumas horas;

- o aumento na velocidade de impacto provoca um aumento exponencial na taxa de atrito;
- a taxa de atrito instantânea pode depender da natureza do sólido e do histórico de cada impacto. Impactos repetitivos, em uma mesma velocidade, podem reduzir ou aumentar a resistência das partículas, provocando a variação da taxa de atrito;
- para placas distribuidoras com um único orifício, a taxa de atrito aumenta exponencialmente com a velocidade superficial do gás. No entanto, para distribuidores com multi-orifícios, a taxa de atrito é proporcional à velocidade superficial do gás;
- A submissão de forças de atrito mecânico pode alterar fisicamente a partícula através de deformação plástica, ou ruptura por clivagem, partição e fratura. Casos específicos foram encontrados na literatura para cristais de NaCl, KCl e MgO.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Descrição do Equipamento

A Figura 2.1 apresenta o esquema do equipamento utilizado para a realização dos ensaios.

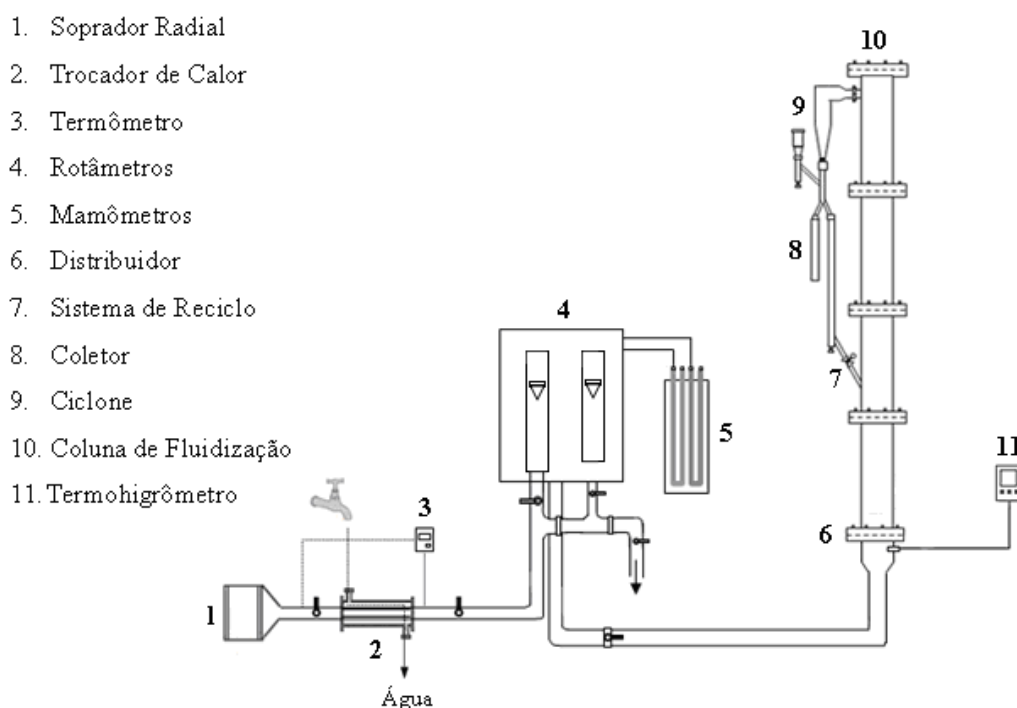


Figura 2.1: Esquema do equipamento utilizado

O equipamento é composto por uma coluna de acrílico formada por quatro seções retas transversais de 0,5 m cada, com diâmetro interno de 0,092 m e altura total de 2,0 m.

Na base da coluna, tem-se o distribuidor do tipo placa perfurada com 5,89% de fração de área livre. Para evitar a passagem do material particulado pelos orifícios da placa, foi utilizada uma tela de 400 mesh de resistência desprezível embaixo do distribuidor.

Acoplado ao topo da coluna, tem-se um ciclone com 0,10 m de diâmetro interno e um coletor, onde o material arrastado é retido. O módulo coletor foi desenvolvido no Laboratório de Tecnologia de Partículas e Processos Multifásicos.

Durante os ensaios, a coluna de fluidização foi alimentada com ar comprimido fornecido por um soprador radial (modelo S1SS M2, marca Elétrica Ampères S.A.) com potência máxima de 7,5 CV. O ar foi resfriado através de um trocador de calor do tipo casco e tubo, utilizando água como fluido refrigerante.

As medidas de temperatura e umidade do leito foram realizadas através de um termohigrômetro digital da marca Incoterm (modelo 9680). A vazão de ar foi medida por um rotâmetro da empresa OMEL S.A. na faixa de vazão entre 10 m³/h e 100 m³/h.

2.2. Material Utilizado

O material sólido escolhido para realização do trabalho foi o cloreto de sódio (NaCl), por ser de baixo custo e de fácil acesso. Além disso, a literatura apresenta um grande número de informações sobre o atrito deste material.

Os cristais de cloreto de sódio (NaCl) comercial, da indústria brasileira Cisne, foram adquiridos no varejo. De acordo com a empresa Cisne (<http://www.salcisne.com.br>), este sal é comercializado para consumo e contém: sal refinado, iodato de potássio e antiemectantes, como ferrocianeto de sódio e alumínio silicato de sódio. A Tabela 2.1 mostra as informações nutricionais fornecidas pelo fabricante.

Tabela 2.1: Informações nutricionais retiradas do site da empresa Cisne

Informação Nutricional (Porção de 1g)		
Quantidade por porção		% VD (*)
Sódio	390mg	16%
Iodo	25mg	19%

(*) Valores Diários de Referência com base em uma dieta de 2.500 calorias

2.3. Capacidade Higroscópica da Partícula

Uma amostra contendo 50g de NaCl foi exposta às condições ambientes do laboratório, no horário entre 13h e 15h20min, para um tempo máximo de 140 minutos, a fim de verificar a capacidade higroscópica da partícula. O resultado do teste pode ser visualizado na Figura 2.2. Após 110 min de exposição, a massa da amostra permaneceu

constante. No final do teste foi possível quantificar o aumento de 0,48 g , correspondendo a 0,96 %. A temperatura e a umidade do ar foram monitoradas através de medições locais do laboratório bem como do site CEPAGRI/Unicamp mantidas na faixa de temperatura (T) de 28,5°C a 30,5°C e umidade relativa (UR) de 57,8 % a 61,7 %

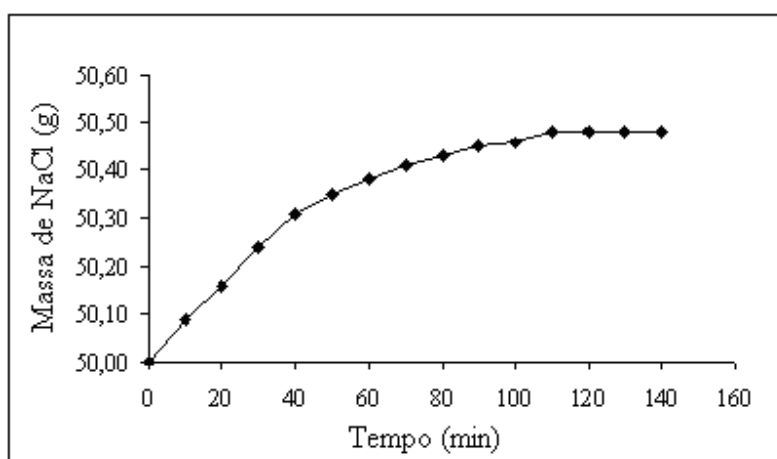


Figura 2.2: Capacidade higroscópica da partícula

2.4. Caracterização das Partículas

A caracterização das partículas NaCl foi feita quanto ao diâmetro médio, massa específica, esfericidade e porosidade. A Tabela 2.2 mostra um resumo dos resultados obtidos e seus respectivos desvios padrões. Os equipamentos utilizados para esta caracterização estão alocados no Laboratório de Análise e Caracterização de Produtos e Processos de responsabilidade do Departamento de Termofluidodinâmica (DTF) e no Laboratório de Recursos Analíticos e de Calibração (LRAC) de uso comum da Faculdade de Engenharia Química/Unicamp. Cada uma das análises será discutida na sequência.

Tabela 2.2: Propriedades físicas das partículas

\bar{d}_p (μm)	Massa Específica (kg/m ³)	Esfericidade (-)	\bar{d}_{poros} (μm)	Porosidade (%)
1420	2165,2±0,0024	0,509±0,010	0,0181±0,0113	3,4334±0,6848
2020	2165,3±0,0024	0,512±0,082	0,0203±0,0003	4,0511±0,6715
2860	2165,7±0,0023	0,588±0,087	0,0208±0,0001	3,5874±0,6715

2.4.1. Diâmetro Médio das Partículas

Através de uma distribuição granulométrica inicial, três diâmetros foram selecionados para o estudo: 1420 μm , 2020 μm e 2860 μm . Os diâmetros médios a fim de caracterizar formas irregulares com maior probabilidade de quebra do material. A disponibilidade dos diâmetros dentro da amostra global.

A análise granulométrica, por peneiramento, foi realizada em triplicata para cada tamanho e o diâmetro médio de Sauter (\bar{d}_p) foi utilizado como referência.

O diâmetro médio de Sauter foi obtido conforme Equação (2.1) e Equação (2.2):

$$\bar{d}_p = \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i}{d_{p_i}} \right)^{-1} \quad (2.1)$$

onde x_i é a fração mássica de partículas retidas entre duas peneiras sucessivas de abertura respectivas de d_i e $d_{(i+1)}$ e,

$$\bar{d}_{p_i} = \frac{d_i + d_{(i+1)}}{2} \quad (2.2)$$

onde i varia de 1 a N intervalos respectivamente.

A Figura 2.3 mostra as distribuições granulométricas obtidas para os três diâmetros escolhidos.

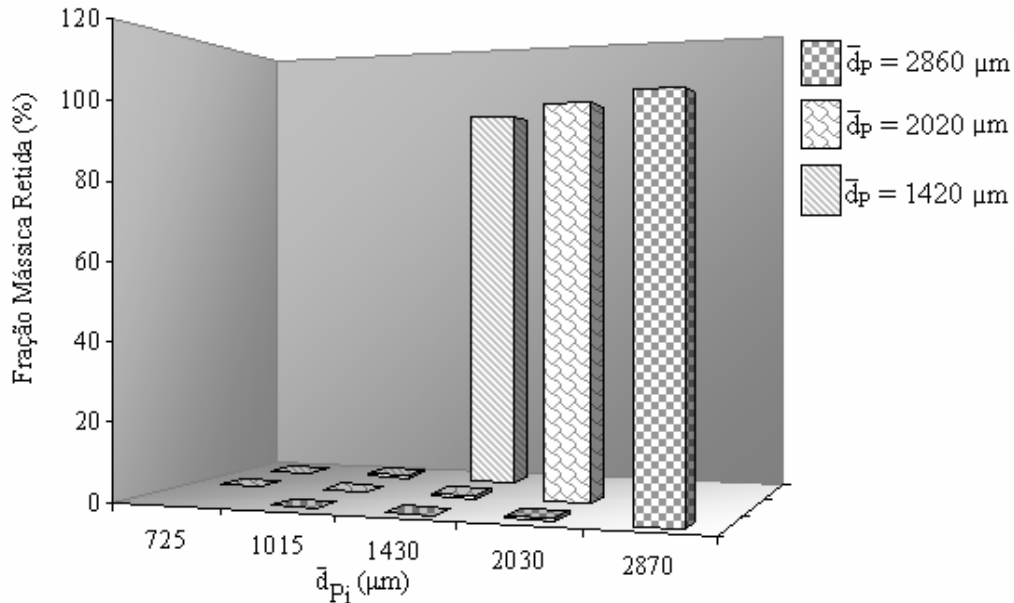


Figura 2.3: Distribuição granulométrica dos três diâmetros de partículas selecionadas

Os resultados das distribuições dos respectivos diâmetros, assim com os gráficos de fração mássica acumulada em função do diâmetro da peneira estão apresentados no anexo A.

2.4.2. Massa Específica das Partículas

A massa específica do NaCl foi determinada através de um picnômetro a gás de Hélio, da marca Micromeritics, modelo AccuPyc 1330 V2.02. O equipamento foi calibrado para realizar 10 medidas de cada amostra obtendo uma média entre as mesmas. As condições utilizadas foram: temperatura média de 25,80°C, taxa de equilíbrio de 0,0010 psig/min com um número de purga igual a 30. A Tabela 2.3 apresenta a massa de NaCl e volume de gás utilizados nos ensaios, bem como os resultados da massa específica para cada diâmetro médio de partícula. Esse método forneceu um desvio padrão muito pequeno, praticamente nulo, tornando o resultado bastante preciso.

Tabela 2.3: Resultados obtidos dos testes de picnometria a gás

$\bar{d}_p (\mu\text{m})$	Massa (kg)	Volume (cm ³)	Massa específica (kg/m ³)
1420	$9,917 \times 10^{-3}$	$4,5945 \pm 0,0030$	$2165,2 \pm 0,0023$
2020	$9,127 \times 10^{-3}$	$4,2205 \pm 0,0040$	$2165,3 \pm 0,0024$
2860	$9,034 \times 10^{-3}$	$4,1802 \pm 0,0026$	$2165,7 \pm 0,0024$

2.4.3. Porosidade das Partículas

Para a determinação da porosidade do NaCl foi utilizado um porosímetro de mercúrio de marca Micromeritics (modelo AutoPore III). A técnica de porosimetria consiste na intrusão de mercúrio nos poros com um aumento de pressão, variando de 0,0138 MPa até 206,8428 MPa. A cada aumento de pressão, o volume de mercúrio inserido foi medido, obtendo-se assim uma distribuição do volume dos poros. A Tabela 2.4 apresenta os resultados obtidos para cada diâmetro de partícula: massa da amostra de NaCl, volume total de intrusão, área total de poros, diâmetro médio de poros, densidade real, densidade aparente e porosidade.

Observa-se que as densidades real e aparente são muito próximas, comprovando ser um cristal com porosidade quase inexistente (máx. 4,05%).

As Figuras 2.4a 2.4b e 2.4c mostram os gráficos obtidos do volume de intrusão acumulado de mercúrio em função do diâmetro dos poros, para os três tamanhos de partículas. Pode-se observar a diferença na inclinação das curvas de intrusão e extrusão de mercúrio, confirmando a distribuição de poros. Nota-se, ainda, que as partículas apresentaram poros com diâmetro entre 0,0063 μm e 5,1897 μm . Porém, o diâmetro médio ficou entre 0,0181 μm e 0,0208 μm . Sendo assim, a porosidade das partículas de NaCl pode ser classificada como mesoporo (0,002 μm e 0,050 μm) (Gregg e Sing, 1982).

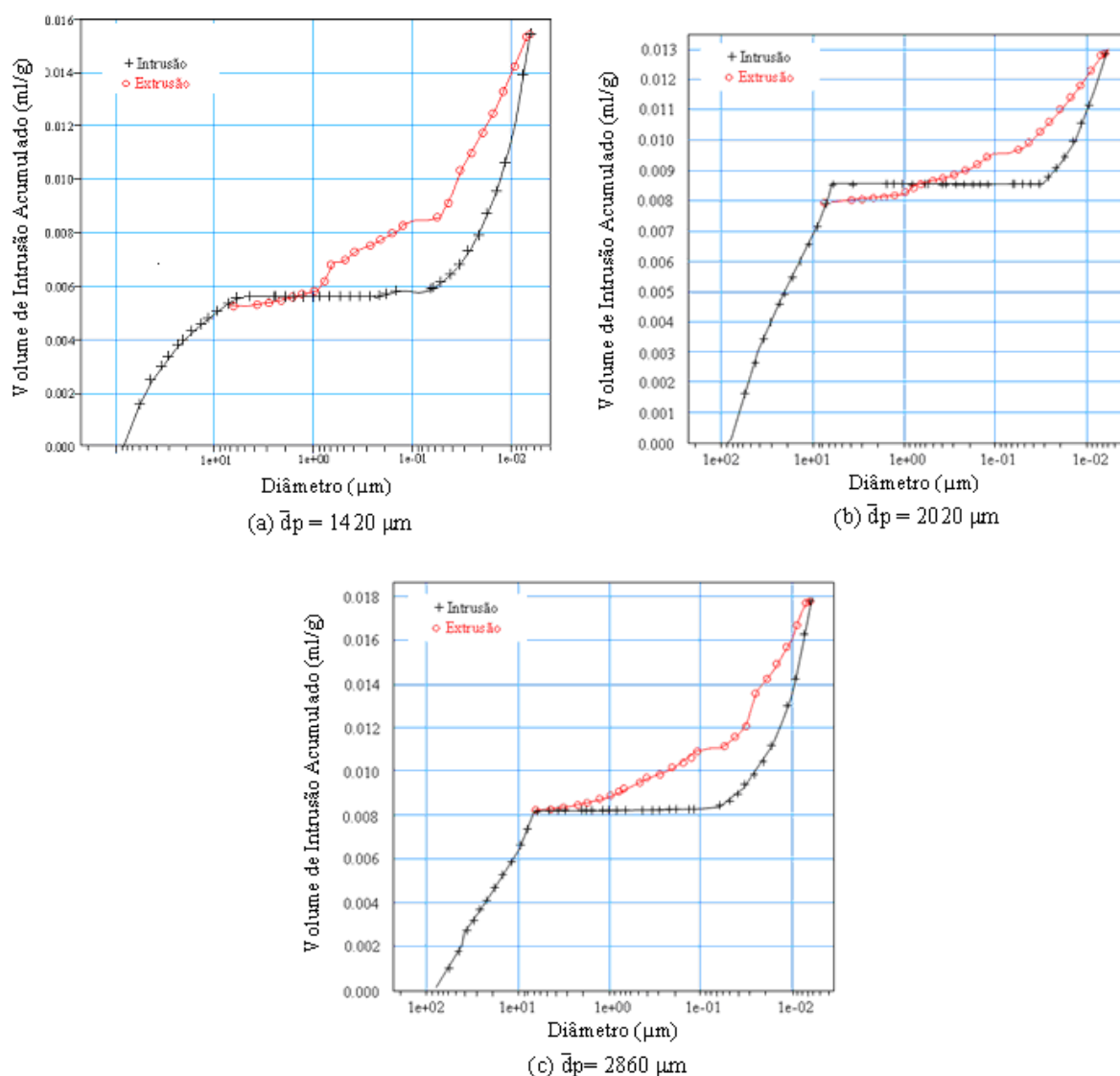


Figura 2.4: Evolução do volume de intrusão acumulado de mercúrio em função do diâmetro dos poros

A porosidade das partículas foi obtida através da equação (2.3) e o diâmetro médio dos poros pela equação (2.4):

$$\text{Porosidade}(\%) = \frac{\rho_{\text{aparente}} - \rho_{\text{real}}}{\rho_{\text{aparente}}} * 100\% \quad (2.3)$$

$$\bar{d}_{\text{poros}} = \frac{4 \cdot \text{volume total de intrusão}}{\text{área de poro}} \quad (2.4)$$

Tabela 2.4: Resultados obtidos através do porosímetro de mercúrio

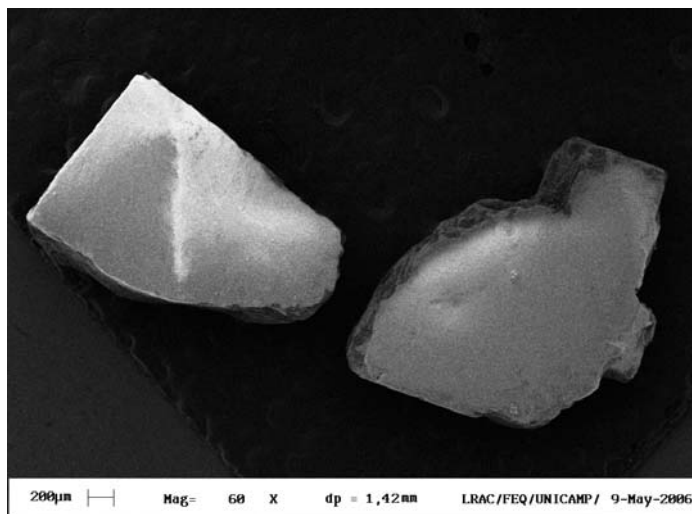
\bar{d}_p (μm)	Massa da Amostra (kg)	Volume Total de Intrusão (m ³ /kg)	Área total de poros (m ² /kg)	Diâmetro médio dos poros (μm)	Densidade real/aparente (kg/m ³)	Porosidade (%)
1420	2,3496 10 ⁻³	1,54 10 ⁻⁵	3409	0,0181	2225,0/2304,1	3,4334±0,6848
2020	1,8976 10 ⁻³	1,82 10 ⁻⁵	3595	0,0203	2225,0/2318,9	4,0511±0,6715
2860	2,2768 10 ⁻³	1,77 10 ⁻⁵	3414	0,0208	2021,7/2096,9	3,5874±0,6715

2.4.4. Análise de Imagem - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

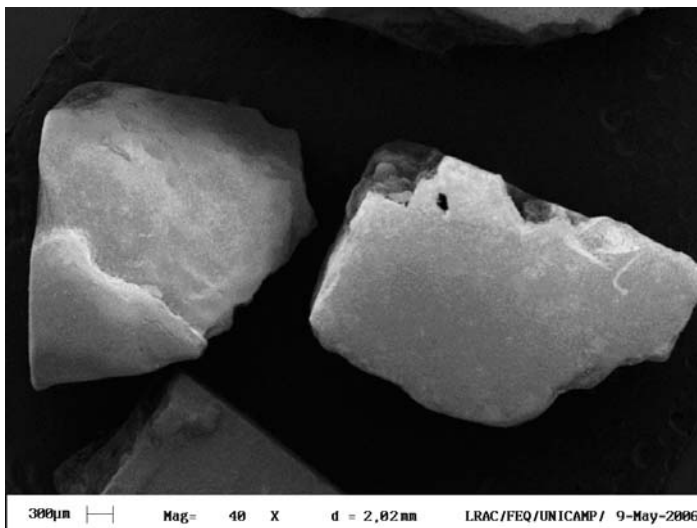
Um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca LEO modelo 440i, foi utilizado para obter imagens precisas das partículas de NaCl, com o objetivo de avaliar a estrutura geométrica das partículas e visualizar a fragmentação e o desgaste das mesmas após a fluidização.

Antes de passar pelo microscópio, as partículas de NaCl foram secas em uma estufa especial, da marca Marconi e modelo MA-035/2, a 100 °C por 24 horas. Em seguida, recobertas com uma fina camada de ouro por um metalizador SPUTTER Coater modelo SC7620, por não apresentar características condutoras. A Figura 2.5 mostra imagens de cada tamanho de partícula, onde é possível observar diferentes formas geométricas e superfícies irregulares que favorecem o atrito dentro do leito.

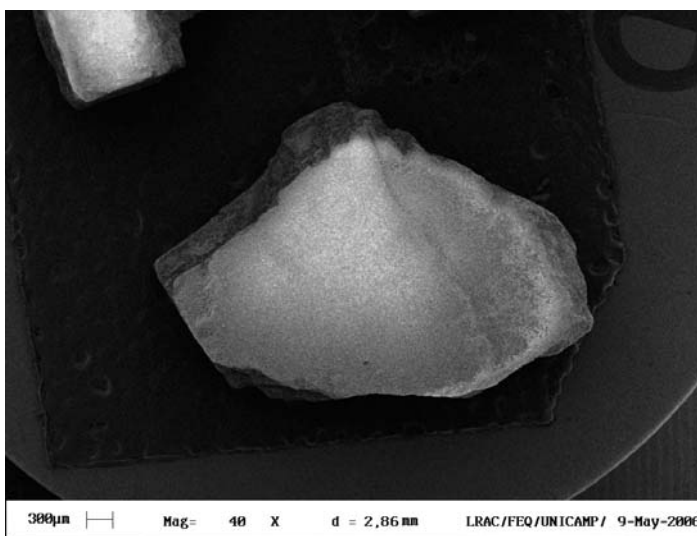
Para visualizar o desgaste, a ruptura e a deformação das partículas de NaCl, algumas destas foram marcadas e fotografadas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) antes e após a passagem pelo leito fluidizado a fim de identificá-las facilmente. Os resultados dessa análise serão discutidos no item 3.6.



(a) $\bar{d}_p = 1420 \mu\text{m}$



(b) $\bar{d}_p = 2020 \mu\text{m}$



(c) $\bar{d}_p = 2860 \mu\text{m}$

Figura 2.5: Imagens das partículas de NaCl obtidas a partir do MEV

2.4.5. Esfericidade das Partículas

A esfericidade das partículas foi determinada através da relação do diâmetro do círculo inscrito e circunscrito da partícula (Equação 2.5), conforme o método proposto por Massarani e Peçanha (1986).

$$\phi = \frac{d_{CI}}{d_{CC}} \quad (2.5)$$

A Figura 2.6 exemplifica de forma ilustrada o método utilizado para obtenção dos valores.

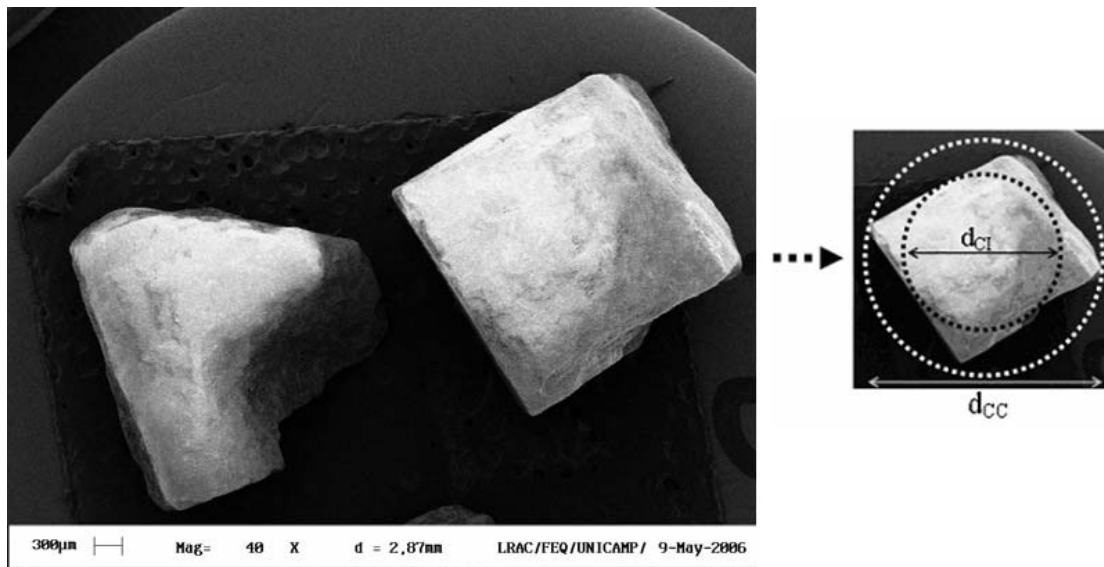


Figura 2.6: Esquema do método utilizado para o cálculo da esfericidade
($\bar{d}_p = 1420 \mu\text{m}$; $\phi = 0,509$)

As imagens utilizadas foram obtidas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV), o mesmo citado no item 2.4.4, com ampliações de 30 a 65 vezes. Para cada diâmetro médio, considerou-se a média de 10 partículas. A Tabela 2.5 apresenta os resultados obtidos e seus respectivos desvios padrões. Observa-se um aumento de 15% da esfericidade com relação ao diâmetro.

Tabela 2.5: Resultados referentes à esfericidade das partículas

\bar{d}_p (μm)	Esfericidade	Desvio Padrão (\pm)
1420	0,509	0,010
2020	0,512	0,082
2860	0,588	0,087

2.4.6. Comportamento das Partículas Utilizadas com Relação à Fluidização

As partículas utilizadas neste trabalho são grandes ($1420 \mu\text{m} < \bar{d}_p < 2860 \mu\text{m}$) e com alta massa específica ($\rho_p = 2165,3 \text{ kg/m}^3$) e por isso pertencem ao grupo D da classificação de Geldart, como mostrado na Figura 2.7. Os diâmetros médios foram selecionados a fim de obter diâmetros adequados a fraturas e desgastes.

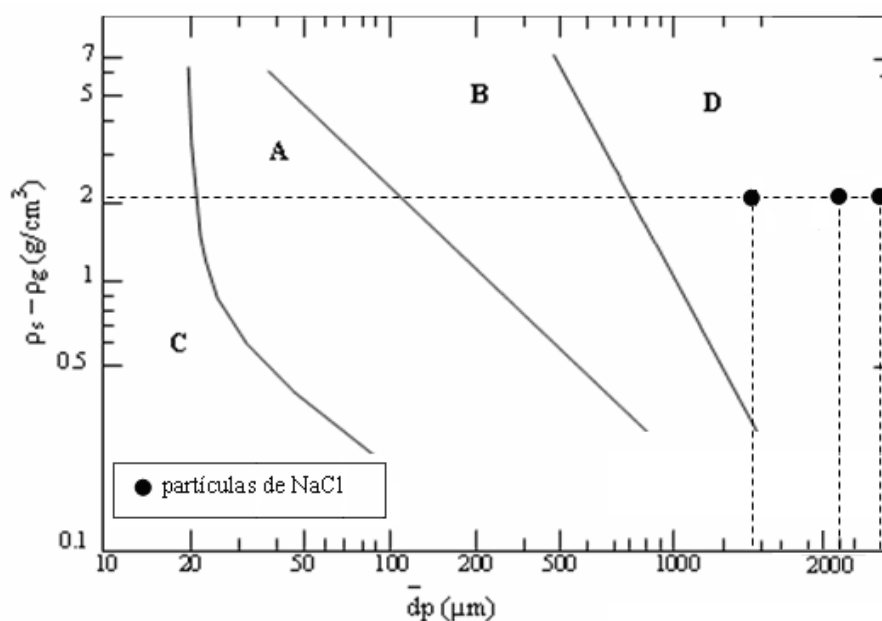


Figura 2.7: Identificação das partículas de NaCl segundo a classificação de Geldart

2.5. Metodologia Experimental

A metodologia aplicada para a obtenção dos dados foi análise por peneiramento a seco antes e após a passagem do NaCl pelo leito fluidizado em diferentes condições

operacionais. Para o desenvolvimento do trabalho foi elaborado um planejamento experimental completo 2^3 conforme segue abaixo.

2.5.1. Planejamento Experimental

Para a análise da variável resposta, taxa de atrito, elaborou-se um planejamento fatorial completo 2^3 com ponto central e repetição, totalizando 18 ensaios. As variáveis independentes foram: o diâmetro médio da partícula, a velocidade superficial do gás e o tempo de fluidização. A Tabela 2.6 apresenta as variáveis independentes e os níveis de maior e menor valor atribuído para cada fator.

Tabela 2.6: Fatores e níveis do planejamento experimental			
Fatores (Variáveis independentes)	Níveis		
	(-1)	0	(+1)
Diâmetro Médio da Partícula (μm)	1420	2020	2860
Tempo de Fluidização (s)	300	1050	1800
Velocidade Superficial do Gás (m/s)	1,25	1,875	2,50
Resposta: Taxa de Atrito (%)			

Os diâmetros médios das partículas foram escolhidos de forma a caracterizarem partículas grandes com formas irregulares, tendo maior probabilidade de quebra do material.

Os valores atribuídos à variável tempo de fluidização foram escolhidos a fim de minimizar a exposição do sólido, já que este possui características higroscópicas elevadas. No entanto, como pode ser visto no item 2.3, os cristais de NaCl obtiveram um aumento de massa de aproximadamente 1% para um tempo máximo de 2 horas. Então, procurou-se realizar os ensaios dentro deste intervalo de tempo.

As velocidades de transição dos diferentes regimes de fluidização (Tabela 2.7) empregadas foram entre a mínima fluidização (U_{mf}) e turbulenta (U_k). A título de lembrança, U_{p-s} corresponde a velocidade de transição do regime pistão ao pistão aparente e U_c , a velocidade de início da transição turbulenta. As velocidades foram determinadas com ajuda do *software* simulador SEREA (Rimoli e Tannous, 2006) e aplicados os modelos

empíricos de Tannous (1993). Em particular, a velocidade mínima de fluidização foi determinada também por Richardson (1971) a fim de comparação e maior precisão da faixa de operação inicial.

Maiores detalhamentos sobre os métodos experimentais empregados para obtenção destas velocidades podem ser vistos em Tannous (1993) e Tannous et al (1996).

Tabela 2.7: Velocidade de transição dos diferentes regimes de fluidização

\bar{d}_p	U_{mf}		U_{p-s}	U_c	U_k
	Richardson (1971)	Tannous (1993)			
1420	0,728	0,807	1,105	2,334	2,723
2020	0,974	1,070	1,376	2,707	3,053
2860	1,240	1,356	1,757	3,135	3,420

A Tabela 2.8 mostra a matriz do planejamento fatorial utilizado para os 18 ensaios, em ordem aleatória, com os valores codificados para as três variáveis escolhidas. Observa-se que os ensaios 9 e 18 são os pontos centrais.

2.5.2. Procedimento Experimental

Os ensaios foram realizados com uma massa de 1200 g de NaCl para uma altura de leito de 0,155 m seguindo a ordem do planejamento experimental.

Antes de cada ensaio, a temperatura e a umidade relativa do ar foram verificadas através do site meteorológico da CEPAGRI/UNICAMP. Tal procedimento se faz necessário para evitar problemas com umidade, já que o material utilizado possui características higroscópicas. Além disso, todos os ensaios foram realizados no período da tarde, entre 13h30min e 16h30min, onde a umidade relativa do ar é mais baixa. Dias chuvosos ou com umidade relativa acima de 50% foram evitados.

Tabela 2.8: Matriz do planejamento fatorial

Ensaio	Diâmetro médio	Tempo	Velocidade superficial do gás
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	0	0	0
10	-1	-1	-1
11	1	-1	-1
12	-1	1	-1
13	1	1	-1
14	-1	-1	1
15	1	-1	1
16	-1	1	1
17	1	1	1
18	0	0	0

Todos os ensaios seguiram a mesma sequência: cada amostra foi devidamente pesada em uma balança semi-analítica (marca Gehaka, modelo BG 4000 g e precisão de 1%) e colocada na coluna de acrílico. Inicialmente o leito foi organizado de forma a torná-lo não empacotado e em seguida, aplicado as condições operacionais para cada experimento. Após o término da operação, o material foi retirado manualmente, pesado e

dividido em nove partes iguais, com frações de 11% cada, permitindo assim uma distribuição mais precisa. Para minimizar as perdas, o material foi pesado na própria peneira. Por fim, a análise granulométrica foi feita novamente e comparada com a inicial (Anexo B).

2.5.3. Determinação da Taxa de Atrito

A taxa de atrito foi obtida através da análise granulométrica por peneiramento, onde a massa da amostra foi protocolada em alguns estágios conforme a metodologia proposta por Duo et al.(1996):

- a massa da amostra inserida no leito (M_i);
- a massa das partículas retidas na primeira peneira após a passagem pelo leito (M_m) e;
- a massa das partículas que passaram através da primeira peneira (M_d).

Nesse método, a perda total (H_L) por manipulação foi calculada e avaliada. Esta perda foi definida e quantificada conforme a Equação (2.6):

$$H_L = \left(1 - \frac{M_m + M_d}{M_i} \right) \times 100\% \quad (2.6)$$

A partir do valor de H_L , a taxa de atrito pôde ser calculada de duas maneiras:

1. Se o valor de H_L for considerado pequeno, a perda é atribuída à manipulação e a taxa de atrito é chamada de taxa de atrito superior (ξ^+), sendo calculada pela Equação (2.7):

$$\xi^+ = \left(1 - \frac{M_m}{M_i} \right) \times 100\% \quad (2.7)$$

2. Se o valor de H_L for alto, a mesma é atribuída à partícula mãe e a taxa de atrito passa a ser chamada de taxa de atrito inferior (ξ^-), sendo calculada pela Equação (2.8):

$$\xi^- = \left(\frac{M_d}{M_m + M_d} \right) \times 100\% \quad (2.8)$$

2.6. Conclusão

As conclusões referentes à etapa de caracterização do material e obtenção dos valores experimentais são que:

- As densidades aparente e real obtidas pelos métodos de picnometria e porosimetria são bastante próximas com uma diferença de no máximo 3,2%;
- Através dos resultados obtidos pelo porosímetro de mercúrio foi possível classificar os cristais de NaCl como mesoporo (0,002 μm e 0,050 μm), comprovando assim a baixa porosidade dos cristais;
- As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiram a visualização da irregularidade das partículas. Além disso, auxiliaram na determinação da esfericidade com diferença nos valores de 15%.
- As partículas de NaCl utilizadas neste trabalho pertencem à categoria D da classificação de Geldart;
- Para a análise da taxa de atrito, foi elaborado um planejamento experimental completo 2^3 com ponto central e repetição. As variáveis independentes foram: o diâmetro médio da partícula, a velocidade superficial do gás e o tempo de fluidização.
- A taxa de atrito foi obtida através da análise granulométrica por peneiramento a seco, antes e após a fluidização. A metodologia aplicada para o cálculo da taxa de atrito foi baseada no trabalho proposto por Duo et al (1996) considerando N partículas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Resultados dos Ensaio do Planejamento Experimental

A título de ilustração seguem abaixo os resultados e as condições operacionais referentes ao primeiro ensaio do planejamento experimental. A Tabela 3.1 mostra um exemplo da distribuição granulométrica com as frações retidas e acumuladas após a passagem das partículas de NaCl pelo leito fluidizado e a Figura 3.1 mostra a comparação entre antes e após a fluidização. As figuras e as tabelas referentes aos demais ensaios estão apresentadas no Anexo B.

Condições operacionais:

1º Ensaio do planejamento: $\bar{d}_p = 1420\mu\text{m}$; $t = 300$ s; $U = 1,25$ m/s

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 24,9^\circ\text{C}$; Umidade Relativa = 44 %

Termohigrômetro: $T_{\text{Interna}} = 25^\circ\text{C}$; UR = 44 %; $T_{\text{Externa}} = 24,5^\circ\text{C}$

Massa inserida no leito = 1200,10 g

Massa retirada do leito = 1195,90 g

Material arrastado e coletado = 0,88 g

Tabela 3.1: Distribuição granulométrica após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{\text{peneira}} (\mu\text{m})$	$\bar{d}_{p_i} (\mu\text{m})$	Massa Retida entre Duas Peneiras (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+10	1680	-	-	-	100
-10 +14	1180	1430	1176,94	98,41	1,59
-14+20	850	1015	17,80	1,49	0,10
-20+28	600	725	0,13	0,01	0,09
-28+35	420	510	0,56	0,05	0,04
- 35	Resíduo	-	0,47	0,04	0,00

A taxa de atrito superior (ξ^+), inferior (ξ^-) e a perda total (H_L) foram calculadas conforme descrito no item 3.4.3. A Tabela 3.2 apresenta os resultados obtidos para as taxas de atrito superior (ξ^+), inferior (ξ^-), perda total (H_L) e o diâmetro médio final da amostra, bem como os valores das massas utilizadas conforme definido no item 2.5.3.

Para o cálculo do diâmetro médio, a massa das partículas com diâmetro menor que 420 μm foi desconsiderada devido à fração residual ser menor que 0,04%.

Tabela 3.2: Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

M_i (g)	M_m (g)	M_d (g)	ξ^+ (%)	ξ^- (%)	H_L	$\bar{d}_p(\mu\text{m})_{\text{final}}$
1200,10	1176,94	18,96	1,92	1,58	0,35	1416

Os resultados mostram que, para as condições de fluidização, $t = 300\text{s}$ e $U = 1,25\text{ m/s}$, a taxa de atrito superior (ξ^+) e inferior (ξ^-) foram mínimas, mantendo o diâmetro médio da amostra praticamente constante. Portanto, pode-se concluir que as partículas de NaCl sofreram apenas desgaste superficial provocando pouca alteração no diâmetro médio da amostra. Esse resultado pode ser confirmado pela sobreposição das curvas da fração mássica acumulada em função do diâmetro médio entre peneiras, antes e após a fluidização, mostrado na Figura 3.1.

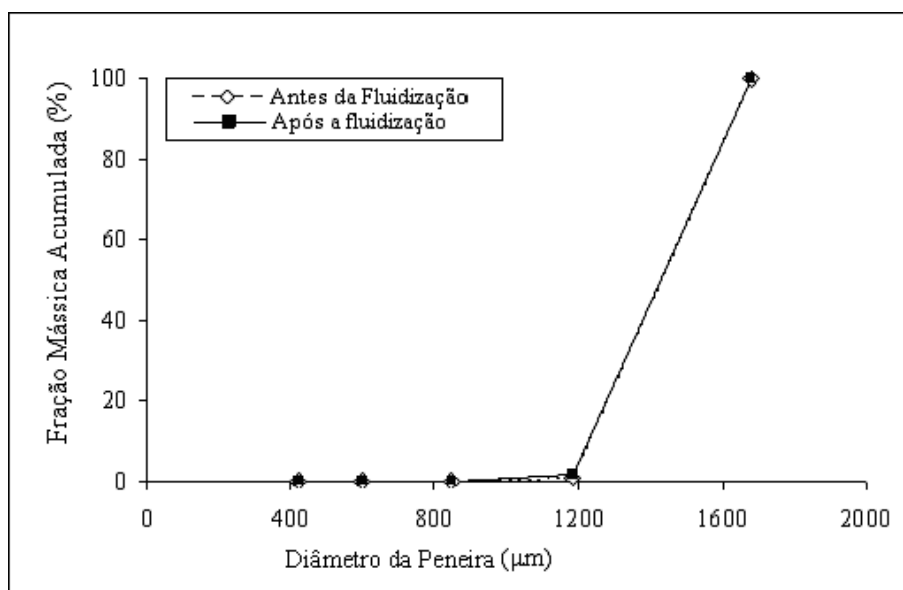


Figura 3.1: Fração mássica acumulada em função do diâmetro médio entre peneiras

3.2. Resultados das Taxas de Atrito e da Perda Total

A Tabela 3.3 mostra os resultados obtidos experimentalmente para a taxa de atrito superior (ξ^+) e inferior (ξ^-), e a perda total (H_L) das partículas de NaCl decorrentes de cada ensaio do planejamento fatorial adotado.

Observa-se que a perda total (H_L) foi muito pequena (menor que 1%) para todos os ensaios. Portanto, pode-se atribuir essa perda à manipulação das partículas de NaCl durante os ensaios. Com isso, serão analisados somente os resultados da taxa de atrito superior (ξ^+).

Tabela 3.3: Resultados obtidos experimentalmente para as taxas de atrito e perdas

Ensaio	\bar{d}_p (μm)	t (s)	U (m/s)	ξ^+ (%)	ξ^- (%)	H_L (%)
1	1420	300	1,25	1,92	1,58	0,35
2	2860	300	1,25	3,69	3,38	0,32
3	1420	1800	1,25	2,32	2,13	0,19
4	2860	1800	1,25	3,74	3,59	0,15
5	1420	300	2,50	3,02	2,8	0,22
6	2860	300	2,50	8,91	8,69	0,24
7	1420	1800	2,50	4,51	3,18	0,37
8	2860	1800	2,50	13,87	13,63	0,27
9	2020	1050	1,87	3,36	3,14	0,28
10	1420	300	1,25	1,97	1,66	0,31
11	2860	300	1,25	3,69	3,47	0,23
12	1420	1800	1,25	2,32	2,13	0,16
13	2860	1800	1,25	3,91	3,63	0,29
14	1420	300	2,50	2,97	2,68	0,29
15	2860	300	2,50	8,81	8,38	0,43
16	1420	1800	2,50	4,58	4,33	0,25
17	2860	1800	2,50	13,91	13,67	0,27
18	2020	1050	1,87	3,34	3,16	0,18

3.3. Análise dos Resultados Referentes à Taxa de Atrito Superior

A Tabela 3.4 mostra os resultados da taxa de atrito superior (ξ^+) das partículas de NaCl e a média entre as duplicatas. A taxa de atrito superior ficou entre 1,95 % e 13,89 %.

Tabela 3.4: Matriz do planejamento fatorial com os resultados obtidos

Ensaio	$\bar{d}_p (\mu\text{m})$	Tempo (s)	U (m/s)	Taxa de Atrito (%)		Média (%)
1 e 10	1420	300	1,25	1,92	1,97	1,95
2 e 11	2860	300	1,25	3,69	3,69	3,69
3 e 12	1420	1800	1,25	2,32	2,32	2,32
4 e 13	2860	1800	1,25	3,74	3,91	3,83
5 e 14	1420	300	2,50	3,02	2,97	3,00
6 e 15	2860	300	2,50	8,91	8,81	8,86
7 e 16	1420	1800	2,50	4,51	4,58	4,55
8 e 17	2860	1800	2,50	13,87	13,91	13,89
9 e 18	2020	1050	1,87	3,36	3,34	3,35

A análise estatística do planejamento experimental pode ser representada geometricamente por um cubo (Figura 3.2), onde os vértices representam a média da taxa de atrito superior (ξ^+).

Os resultados mostraram que a taxa de atrito superior (ξ^+) aumentou com a velocidade superficial do gás, diâmetro médio das partículas e tempo de fluidização.

O aumento da velocidade provocou um aumento no número de colisões entre as partículas e partículas-parede do leito. Para as partículas maiores ($\bar{d}_p = 2860 \mu\text{m}$) esse aumento foi mais significativo em decorrência da deformação dos grandes pistões de gás, que movimentaram o leito no sentido ascendente e descendente de forma abrupta. Isto favoreceu o processo de fragmentação e desgaste erosivo das partículas. Além disso, salienta-se a forma geométrica irregular das mesmas auxiliando este processo (Figura 2.5).

Com relação ao diâmetro médio das partículas, a variação da taxa de atrito superior (ξ^+) foi menor, para o maior tempo ($t = 1800 \text{ s}$) e menor velocidade superficial do gás ($U = 1,25 \text{ m/s}$), passando de 2,320 % para 3,825 %, para o menor diâmetro, por exemplo. Isso se justifica pelo fato do leito de partículas de maior diâmetro ($\bar{d}_p = 2860 \mu\text{m}$) estar operando em condições próximas a mínima fluidização, provocando somente deslizamento das

mesmas (erosão) sem perda de material sólido. Para as partículas menores, o escoamento ocorreu em velocidade correspondente à transição turbulenta e pistão aparente causando maior desgaste das partículas.

O mesmo fenômeno acontece quando se observa à variável tempo, mas em menor proporção, passando de 1,945 % para 2,320 %, acarretando uma menor influência sobre a taxa de atrito superior. Justifica-se que o tempo utilizado não foi suficiente para observar maiores danos às partículas. Esta variável deve ser melhor discutida em trabalhos futuros.

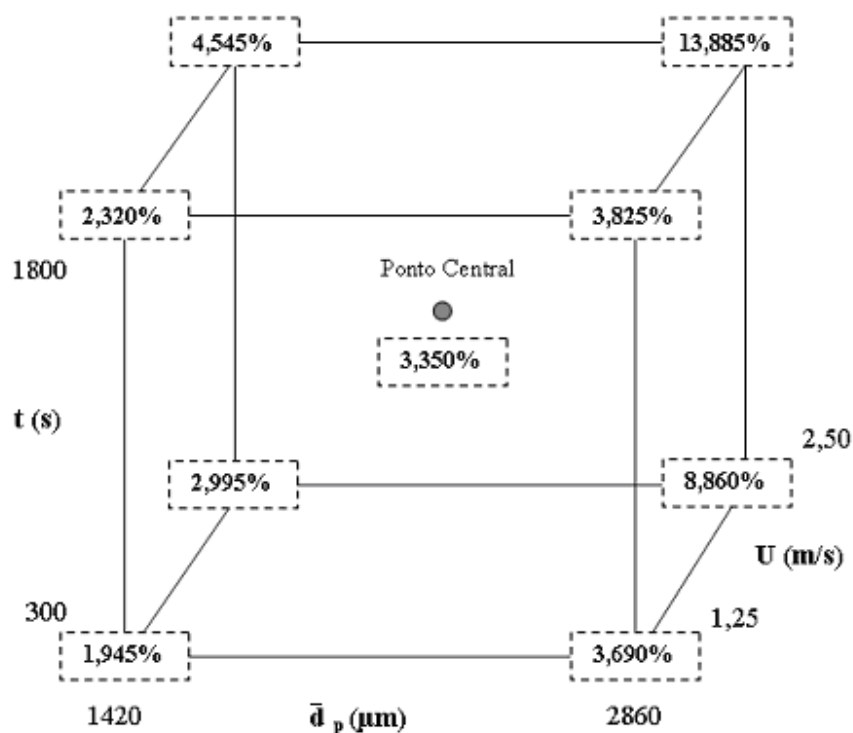


Figura 3.2: Representação geométrica dos resultados obtidos da taxa de atrito superior (ξ^+)

3.4. Avaliação dos Modelos Estatísticos

A influência do diâmetro médio da partícula, do tempo de fluidização e da velocidade superficial do gás, sobre a taxa de atrito das partículas de NaCl em um leito fluidizado gasoso foi quantificada através da aplicação do *software* STATISTICA®. Um modelo completo de 1º ordem, com duas e três interações entre os fatores, foi simulado e avaliado.

O modelo, com interação entre dois fatores, mostrou que todas as variáveis independentes apresentaram efeito significativo sobre a variável resposta. Das interações propostas, apenas a interação diâmetro médio e tempo, não apresentou um efeito significativo ($p > 0,05$) e pode ser excluída do modelo.

Como existem três fatores no planejamento, o efeito de interação de dois deles em princípio depende do nível do terceiro. Para confirmar a interação entre estas, simulou-se ainda um modelo de 1º ordem com interação de três fatores. Porém, a interação entre estes sendo $\bar{d}_p * t * U$, o efeito não se mostrou significativo ($p=0,0659$) e foi excluído do modelo. Portanto, concluímos que o modelo de 1ª ordem com interação de dois fatores foi o mais representativo.

3.5. Modelo Estatístico Adotado

A Tabela 3.5 mostra os efeitos das variáveis independentes, para um modelo de 1ª ordem com interações de dois fatores. Todas as variáveis independentes apresentaram efeito significativo sobre a variável resposta no nível de 95% de confiança, sendo que, das interações propostas, apenas a interação diâmetro médio e tempo de fluidização não apresentou um efeito significativo ($p > 0,05$) e, portanto pode ser excluída do modelo.

Tabela 3.5: Estimativa dos efeitos para um modelo com duas interações

Variáveis Independentes	Efeitos	Desvio Padrão	t(11)	P	Limite de Confiança de 95%	
					Inferior	Superior
Média	5,0467	0,2243	22,4990	0,0000	4,5530	5,5404
\bar{d}_p	4,6150	0,4758	9,6989	0,0000	3,5677	5,6623
t	1,7725	0,4758	3,7251	0,0034	0,7252	2,8198
U	4,6275	0,4758	9,7252	0,0000	3,5802	5,6748
$\bar{d}_p * t$	0,8100	0,4758	1,7023	0,1168	-0,2373	1,8573
$\bar{d}_p * U$	2,9900	0,4758	6,2838	0,0001	1,9427	4,0373
t * U	1,5175	0,4758	3,1892	0,0086	0,4702	2,5648

A significância dos efeitos individuais e das interações das variáveis é confirmada pelo gráfico de Pareto (Figura 3.3), no qual os efeitos estatisticamente significativos estão à direita da linha vertical indicativa do limite de confiança de 95% ($p = 0,05$), escolhido para o trabalho.

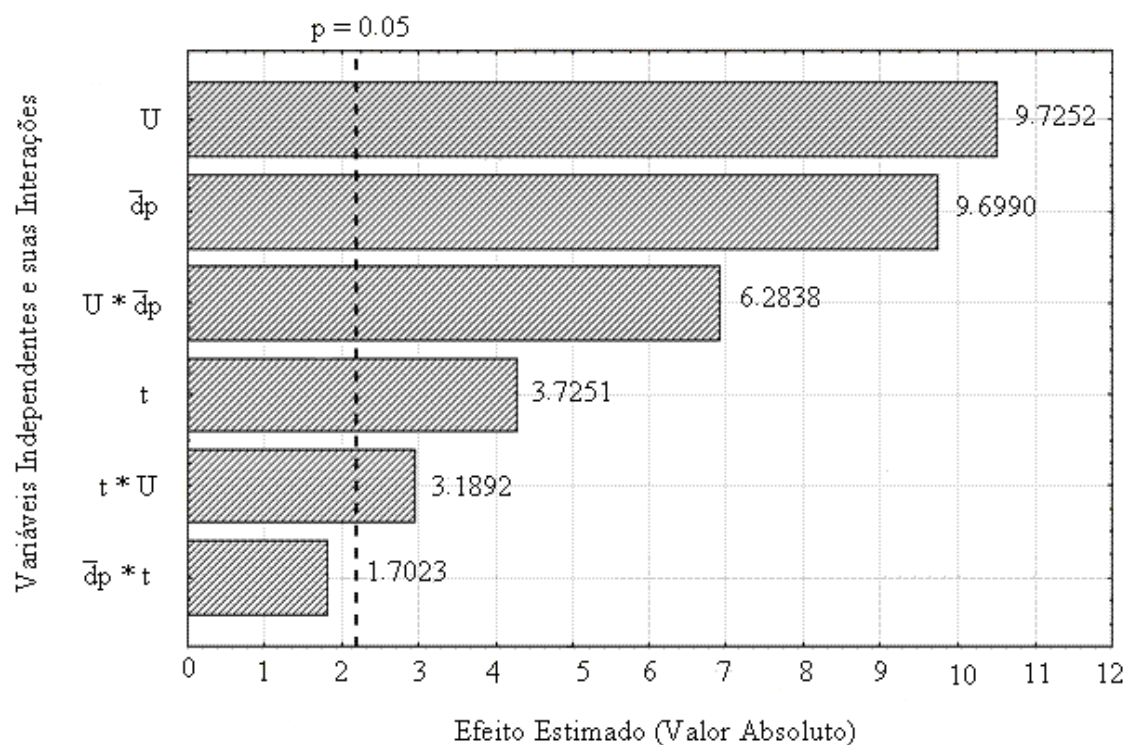


Figura 3.3: Gráfico de pareto com duas interações

As interações realizadas afirmam que todas as variáveis independentes (\bar{d}_p , t e U) possuem efeitos significativos sobre a variável resposta - taxa de atrito - e não podem ser eliminadas do modelo estatístico.

A Tabela 3.6 apresenta a estimativa para os coeficientes de regressão das variáveis independentes e das interações que apresentaram efeito significativo sobre a variável resposta (taxa de atrito superior).

Tabela 3.6: Estimativa dos coeficientes de regressão

Variáveis Independentes	Coeficiente de Regressão	Desvio Padrão	t(12)	P	Limite de Confiança de 95%	
					Inferior	Inferior
Média	5,0467	0,2414	20,9065	0,0000	4,5207	5,5726
\bar{d}_p (μm)	2,3075	0,2560	9,0124	0,0000	3,4993	5,7307
t (s)	0,8863	0,2560	3,4614	0,0047	0,6568	2,8882
U (m/s)	2,3138	0,2560	9,0368	0,0000	3,5118	5,7432
\bar{d}_p (μm)*U(m/s)	1,4950	0,2560	5,8390	0,0001	1,8743	4,1057
t(s)*U(m/s)	0,7588	0,2560	2,9635	0,0118	0,4018	2,6332

A Equação (3.1) representa um modelo estatístico com 92,60% de ajuste e $R^2 = 0,9478$, que relaciona a resposta do processo taxa de atrito superior, (ξ^+) com as variáveis e as interações com efeito significativo.

$$\xi^+ = 5,0467 + 2,3075 \cdot \bar{d}_p + 0,8863 \cdot t + 2,3138 \cdot U + 1,4950 \cdot \bar{d}_p \cdot U + 0,7588 \cdot t \cdot U \quad (3.1)$$

A significância estatística do modelo é determinada pela análise da variância (ANOVA), como mostra a Tabela 3.7.

A partir dos resultados obtidos para $SQ_{\text{Regressão}}$ (228,387) e $SQ_{\text{Resíduo}}$ (12,586) foi possível determinar a porcentagem de variação explicada (R^2), obtendo um resultado bastante satisfatório de 94,78% e a porcentagem de máxima variação explicada correspondendo a 99,99%.

Para verificar a predição do modelo e a falta de ajuste, aplicamos o teste “F”. O valor da razão MQ_R/MQ_f é 43,54, ou seja, o $F_{\text{calculado}}$ é 14 vezes maior do que o F_{tabelado} (no nível de 95% de confiança), o que indicaria uma regressão significativa, se não fosse pela falta de ajuste. A falta de ajuste é confirmada pelo alto valor de $MQ_{\text{faj}}/MQ_{\text{ep}}$, que é cerca de 390 vezes maior do que o F_{tabelado} . Sendo assim, o modelo proposto não pode ser usado para fins preditivos. Porém, pode ser utilizado para uma análise qualitativa dos efeitos das variáveis sobre taxa de atrito superior (ξ^+) (Rabelo et al., 2007; Barros et al., 2003).

Tabela 3.7: Tabela ANOVA

Fonte de Variação	Soma Quadrática (SQ)	Graus de Liberdade (t)	Média Quadrática (MQ)
Regressão (R)	228,387	5	45,677
Resíduo (r)	12,586	12	1,049
Falta de Ajuste (faj)	12,561	3	4,187
Erro Puro (ep)	0,025	9	0,003
Total	240,973	17	

% de Variação Explicada (R^2): 94,78%

% Máxima de Var. Explicada: 99,99%

*F = $MQ_R/MQ_r = 43,54$ **F = $MQ_{faj}/MQ_{ep} = 1.507,2$

Valores de $F_{Tabelado}$ (95% de confiança): *F_{5;12} = 3,11; **F_{5;12} = 3,86

*F: Teste de significância para regressão

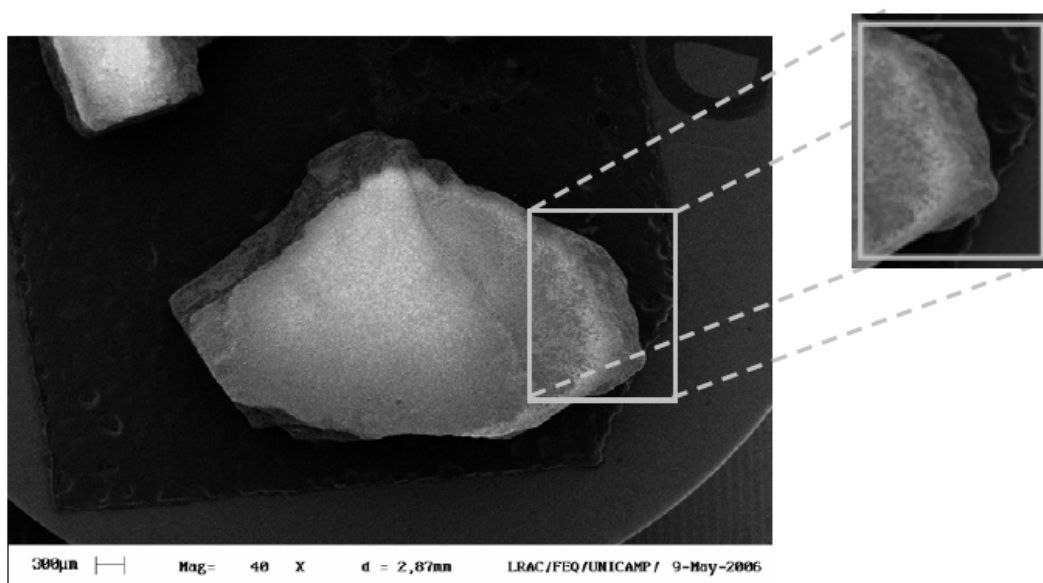
**F: Teste da falta de ajuste

3.6. Resultado das Análises da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

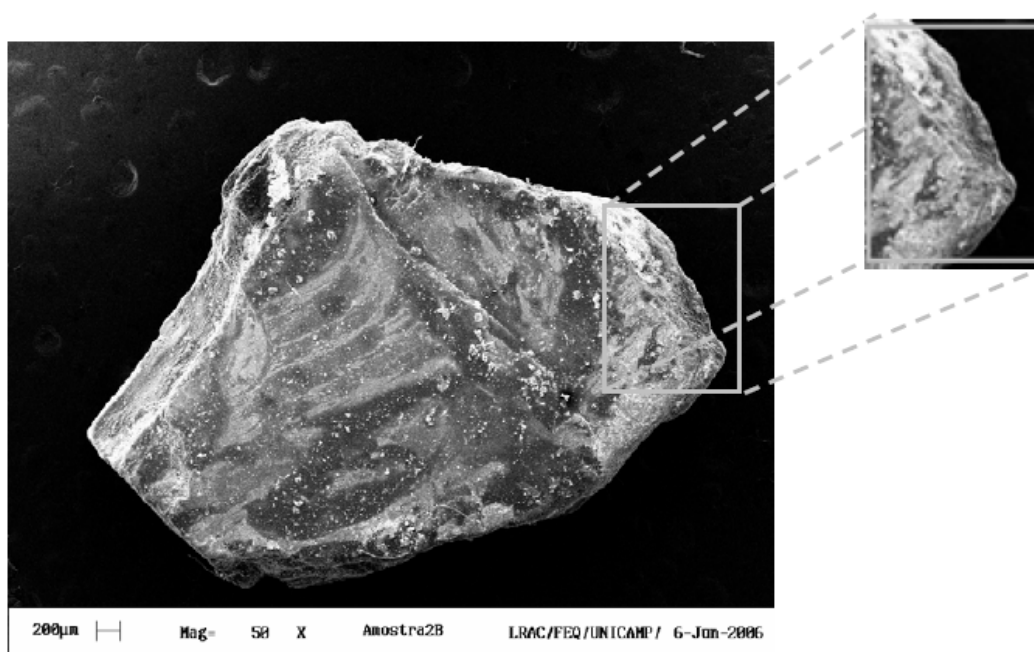
Observa-se que nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6, as amostras de NaCl ($1420\mu\text{m} < \bar{d}_p < 2860\mu\text{m}$) não estão propriamente representadas nas três dimensões, provocando diferenças de brilho e baixa nitidez. Apesar disso, em algumas imagens é nítida a quebra efetiva e a perda de material.

A perda de material ocorreu principalmente nas bordas, pelo desgaste das partículas (Figura 3.4a e 3.4b) e, nas arestas e saliências através de fragmentação (3.5a e 3.5b). Devido às irregularidades e ao grande número de impactos sofridos por estas durante o processo de fluidização, estes fenômenos podem ocorrer na mesma partícula (Figura 3.6).

Com relação ao tipo de deformação encontrada nas partículas de NaCl, pode-se classificá-lo como deformação plástica com fratura.

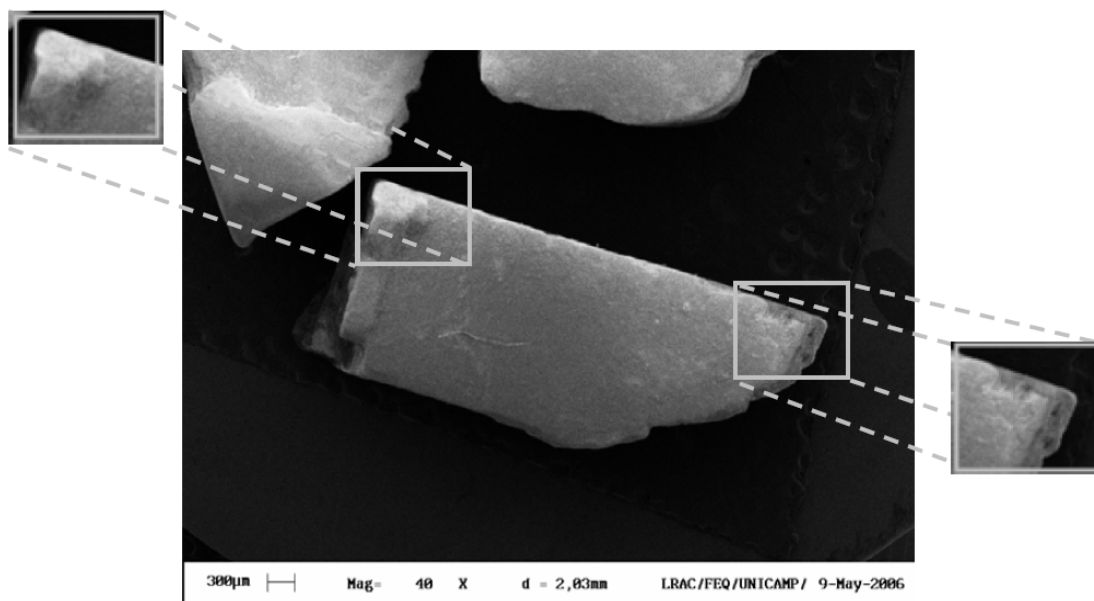


(a) Antes da passagem pelo leito

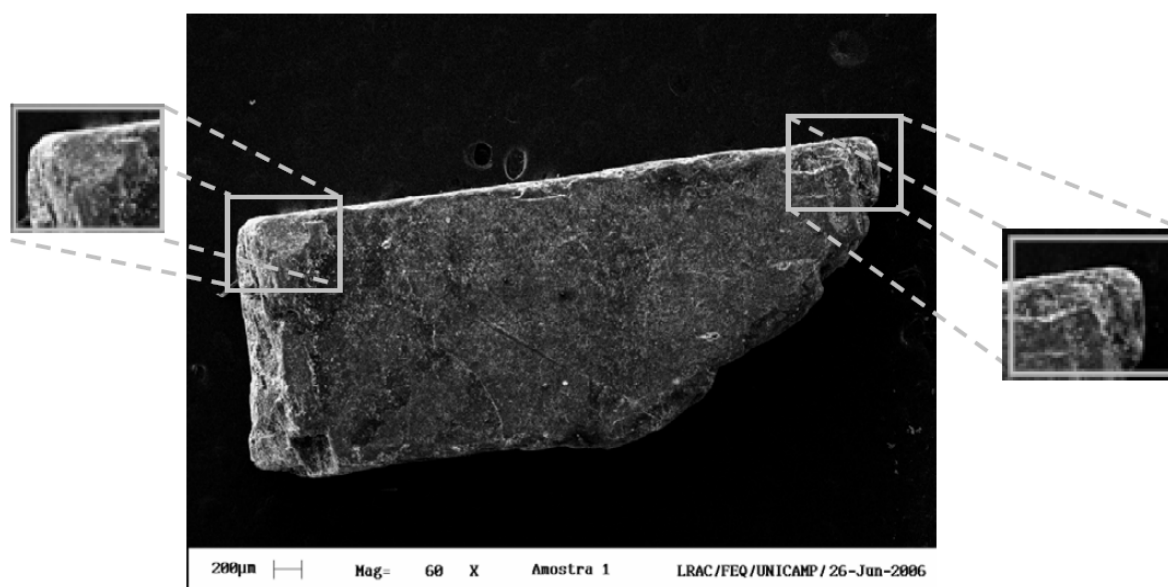


(b) Após a passagem pelo leito

Figura 3.4: Imagens de MEV das partículas de NaCl com $\bar{d}_p = 2870 \mu\text{m}$
 $(\bar{d}_p = 2860 \mu\text{m} ; t = 300\text{s} ; U = 2,25\text{m/s})$



(a) Antes da passagem pelo leito



(b) Após a passagem pelo leito

**Figura 3.5: Imagens de MEV das partículas de NaCl com $\bar{d}_p = 2030 \mu\text{m}$
($\bar{d}_p = 2020 \mu\text{m}$; $t = 1050\text{s}$; $U = 1,875\text{m/s}$)**

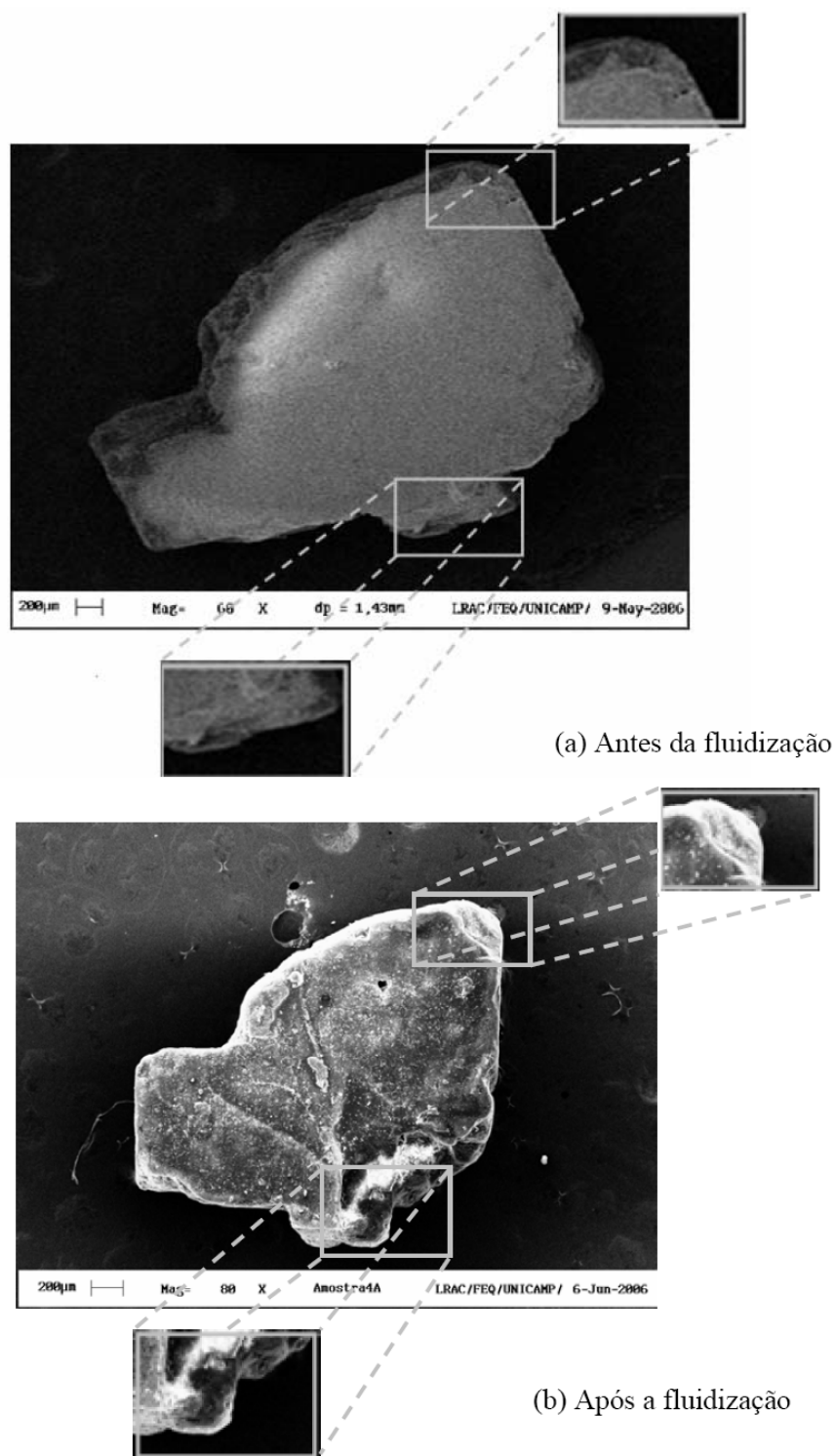


Figura 3.6: Imagens de MEV das partículas de NaCl com $\bar{d}_p = 1420 \mu\text{m}$
($\bar{d}_p = 1420 \mu\text{m}$; $t = 300\text{s}$; $U = 2,25\text{m/s}$)

3.7. Conclusão

Analisando os resultados obtidos a partir do planejamento experimental adotado, foi possível concluir que:

1. As maiores taxas de atrito, tanto a superior (ξ^+) como a inferior (ξ^-), ocorreram nas condições extremas: maior tempo de fluidização, velocidade superficial do gás e diâmetro da partícula. A perda total (H_L) foi mínima em todos os ensaios (menor que 1%), e por isso foi atribuída à manipulação das partículas. Nestas condições, permitiu-se o favorecimento da fragmentação e do desgaste erosivo das partículas. A geometria irregular das mesmas auxiliou neste processo;
2. Um modelo estatístico linear com três variáveis e duas interações foi proposto através do planejamento experimental e do *software* STATISTICA[®]. Através do teste “F”, foi possível concluir que o modelo proposto pode ser utilizado apenas para uma análise qualitativa dos fatores estudados sobre a taxa de atrito superior (ξ^+);
3. A análise qualitativa feita através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) comprovou a presença de desgaste e fragmentação nas arestas e saliências das partículas após a passagem pelo leito e foi possível concluir que ambos podem ocorrer numa mesma partícula. Portanto, pode-se concluir que as partículas sofreram deformações plásticas, com deformações permanentes na superfície do sólido e fratura de partes do material.

CONCLUSÃO GERAL

Após análise dos resultados obtidos experimentalmente foi possível concluir que:

- Dentro da literatura consultada, até o momento, não foi possível comparar efetivamente de forma quantitativa os resultados obtidos, em função das restrições experimentais encontradas. Estas restrições são referentes aos experimentos para uso de uma só partícula.
- As partículas de NaCl foram caracterizadas de acordo com suas propriedades físicas ($1420\text{ }\mu\text{m} < \bar{d}_p < 2860\text{ }\mu\text{m}$ e $\rho_p = 2165,3\text{ kg/m}^3$) como pertencentes à categoria D classificação de Geldart. Quanto à porosidade, estas foram classificadas como mesoporos ($0,0181\text{ }\mu\text{m} < \bar{d}_{\text{poros}} < 0,0208\text{ }\mu\text{m}$). Imagens obtidas a partir do microscópio eletrônico de varredura (MEV) confirmaram a irregularidade das partículas de NaCl e auxiliaram no cálculo da esfericidade, que ficou entre 0,509 e 0,588.
- Um estudo experimental foi realizado, a partir de um planejamento experimental 2^3 e um ponto central, considerando o efeito das variáveis U (1,25 m/s, 1,87m/s e 2,50 m/s), \bar{d}_p (1420 μm , 2020 μm , 2860 μm) e t (300 s, 1050 s, 1800 s) sobre a taxa de atrito.
- Três definições foram aplicadas para determinação da taxa de atrito: taxa de atrito superior (ξ^+), taxa de atrito inferior (ξ^-) e perda total (H_L). Os resultados mostraram que a taxa de atrito superior (ξ^+) e inferior (ξ^-) foram muito próximas e que a perda total (H_L) foi mínima, atribuída a manipulação do material durante os ensaios;
- Mediante resultados do planejamento, a taxa de atrito superior (ξ^+) foi influenciada pelos fatores na seguinte ordem: velocidade superficial do gás, diâmetro médio das partículas e tempo de fluidização. O aumento da velocidade provocou um aumento no número de colisões entre as partículas e partículas-parede do leito favorecendo o processo de fragmentação e desgaste erosivo das partículas. Ressalta-se que as velocidades escolhidas não correspondem às mesmas condições fluidodinâmicas (regime de pistão à início da turbulência) acarretando desgastes diferenciados entre os diferentes tamanhos de partículas. O

curto intervalo de tempo não foi suficiente para provocar danos maiores às partículas;

- A análise qualitativa realizada através das imagens de microscopia verificou o desgaste, deformações plásticas permanentes na superfície do sólido e fratura de partes do material após a fluidização;
- A correlação proposta obteve 94,78% de ajuste e o valor de F para a regressão teve um resultado significativo ($F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$), porém o alto valor de F para a falta de ajuste mostrou que o modelo não pode ser usado para fins preditivos.

Trabalhos Futuros

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, podem-se sugerir como trabalhos futuros:

- Elaborar um novo planejamento experimental, aumentando o número de níveis para os fatores estudados, com o objetivo de avaliar ajustes polinomiais (grau 2 ou mais), com o objetivo de tornar o modelo preditivo;
- Realizar novos ensaios aumentando o tempo de fluidização com objetivo de rever e melhor avaliar a influência do parâmetro tempo sobre a taxa de atrito;
- Dividir o leito em camadas com o objetivo de estudar e quantificar a taxa de atrito em diferentes regiões do mesmo;
- Aplicar novos testes utilizando outros tipos de materiais como: KCl, MgO e catalisadores. A realização de alguns ensaios utilizando misturas como carvão e areia, alumina e areia, entre outros, pode ser útil para avaliar a taxa de atrito de misturas em leito fluidizado.
- Avaliar a influência da placa distribuidora sobre a taxa de atrito, utilizando diferentes tipos de placas: com multi-orifícios, com um único orifício ou porosas, a fim de comparativos com dados da literatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARROS N., B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E., *Como fazer Experimentos*. 2 Ed., Editora UNICAMP, 2003. Cap. 3, p. 85 – 146.
- BEMROSE. C. R.; BRIDGWATER J., A Review of Attrition an Attrition Test Methods, *Power Technology*, vol. 49, p. 97 – 126, 1987.
- BLINICHEV, V.N.; STRELTSOV, V.V.; LEBEDEVA, E.S., An Investigation of the Size Reduction of Granular Materials During their Processing in Fluidized Beds, *Int. Chem. Eng.*, vol. 8, n. 4, p. 615-715, 1968.
- BOEREFIJN, R.; GHADIRI, M.; Attrition of Fluid Cracking Catalyst in Fluidized Beds, *Fifth World Congress on Chemical Engineering, San Diego/USA*, vol. VI, p. 273-278, 1996.
- DANO, J. D.; *Manual de Mineralogia*, vol. 1, Ed. Ao livro Técnico S.A, Rio de Janeiro, 1969. Cap III, p.157 – 161.
- DUBIEL, Adriano da Silva. *Propriedades Mecânicas de Junções Supercondutoras de YBCO*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005. p. 23. Tese (Mestrado)
- DUO, W.; BOEREFIJN, R.; GHADIRI, M.; WILLIAMS, C.P., Impact Attrition of Fluid Cracking Catalyst, *Proc. 5th Intern. Conf. on Multiphase Flow in Industrial Plants, Amalfi (It.)*. p. 170-179, 1996.
- FERRAZ, H. O Aço na Construção Civil, *Revista Eletrônica de Ciências*, São Carlos, n. 22, out. 2003. Disponível em:<http://cdcc.sc.usp.br/ciencia/artigos/art_22/aco.html>. Acesso em Jan. 2008.
- FORSYTHE, W. L.; HERTWIG, W.R., Attrition Characteristics of Fluid Cracking Catalysts, *Ind. & Engng. Chem.*, vol. 41, p. 1200-1206, 1949.
- GELDART, D., Types of Gas Fluidization, *Powder Techn.* 7, p. 285, 1973.
- GHADIRI, M.; BOEREFIJN, R., A Model of Attrition in the Jetting Region of Fluidised Beds, *KONA Power and Particle*, nº 14, p. 5-15 , 1996.
- GHADIRI, M.; ZHANG, Z., Impact Attrition of Particulate Solids. Part 1: A theoretical model of chipping, *Chem. Engng. Science*, vol. 57, p. 3671-3686, 2002.

- GOMIDE, R., *Operações com Sistemas Sólidos Granulares*. 1ª ed., vol 1, Editora FCA, São Paulo, 1983. Cap. VIII, p. 237 – 281.
- GRACE, J. R., *Hydrodynamics of Gas-Fluidized Beds, Fluidized Bed Boilers: Design and Application*, Person Press, Canada, 1994.
- GREGG, S. J.; SING, K.S.W., *Adsorption Surface Area and Porosity*, 2º ed., Editora Academic Pressinc, New York, 1982. Cap. III, p. 111 – 112.
- GUEDES, M. U., *Atrição e Elutriação de Partículas Sólidas em Leito Fluidizado Gasoso*, Universidade Estadual de Campinas, 2004, Relatório Final de Pesquisa PIBIC/CNPq.
- KALMAN, H., *Attrition Control by Pneumatic Conveying*, Power Technology, vol. 104, p. 214 – 220, 1999.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O., *Fluidization Engineering*, 2ª Edição, Editora Butterworth-Heinemann, Boston, 1991.
- MASSARANI, G.; PEÇANHA, R. P., *Dimensão Característica e Formas de Partículas*, Anais do XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Campinas, 1986, p. 313-312.
- PASSOS, L.; *Apostila de Ciências e Tecnologia de Materiais*, Faculdades Integradas Einstein de Limeira, Limeira – SP. Disponível em: <http://www.fiel.edu.br/painel/uploads/08_08_2007__08_46_15APOSTILA%20CIENTEC.pdf> Acesso em: Mar. de 2008
- RABELO, S. C.; MACIEL, R. F; COSTA, A. C., *A Comparison Between Lime and Alkaline Hydrogen Peroxide Pretreatments of Sugarcane Bagasse for Ethanol Production*, Appl Biochem Biotechnol, vol. 144, p. 87-100, 2008.
- RIMOLI, D.; TANNOUS, K., *Simulator Software applied to Fluidized Bed Reactor – SEREA*, Proc. of 5th Intern Conf. for Conveying and Handling of Particulate Solids, Sorrento/Itália, 2006, Impressão digital.
- RUSSELL, J. B.; *Química Geral*. 2ª ed., vol. 1, Editora Makron Books, São Paulo, 1994. cap. 9: Sólidos, p. 434 – 435.
- STEIN, M.; SEVILLE, J.P.K.; PARKER, D.J., *Attrition of Porous Glass Particles in a Fluidised Bed*, Powder Techn., vol 100, p. 242-250, 1998.

TANNOUS, K., HEMATI, M., LAGUERIE, C., Identification of Flow Regime Transitions in Fluidized Beds of Large Particles by Pressure Drop Fluctuation Measurements, Brazilian J. of Chem. Engng., vol. 13, p. 168-181, 1996.

TANNOUS, Katia. *Contribution à l'Etude Hydrodynamique de Lits Fluidisés de Grosses Particules*. França. Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), 1993. Tese (Doutorado).

ZHANG, Z., GHADIRI, M., Impact Attrition of Particulate Solids. Part 2: Experimental Work, Chem. Engng. Science, vol. 57, p. 3671-3686, 2002.

WAHLSTOM, E. E., *Cristalografia Óptica*, 1ª ed., Ed. Ao Livro Técnico S.A e Editora USP, Rio de Janeiro, 1969. cap. I, p. 9 -11.

WERTHER, J.; REPPENHAGEM, J., Catalyst Attrition in Fluidized-Bed Systems, AIChE Journal, vol. 45, nº 9, p. 2001 – 2010, 2004.

WHITCOMBE, J.M.; AGRANOVSKI, I.E.; BRADDOCK, R.D, Attrition Due to Mixing of Hot and Cold FCC Catalyst Particles, Power Technology, vol. 137, p. 120 – 130, 2003.

Links Consultados

CEPAGRI METEOROLOGIA UNICAMP - Centro de Pesquisas Meteorológicas Aplicadas a Agricultura. Disponível <<http://orion.cpa.unicamp.br/portal/index.php>>. Acesso em: jul. 2006.

REFINARIA NACIONAL DE SAL S.A. (2006), Sal Cisne. Disponível em: <http://www.salcisne.com.br/cozinha4_popup2.html>. Acesso em: out. 2006.

ANEXO A: Resultados Referentes à Distribuição Granulométrica do NaCl

A.1. Distribuição da Amostra de NaCl com $\bar{d}_P = 1420\mu\text{m}$ Antes da Fluidização

Tabela A.1 - Distribuição Granulométrica ($M_T = 102,30\text{g}$)

Peneiras Padrão Tyler	$d_{\text{peneira}} (\mu\text{m})$	$\bar{d}_{P_i} (\mu\text{m})$	Massa Retida entre Duas Peneiras (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+10	1680	-	-	-	100
-10 +14	1180	1430	101,38	99,12	0,88
-14+20	850	1015	0,82	0,80	0,08
-20+28	600	725	0,03	0,03	0,05
-28+35	420	510	0,00	0,00	0,05
- 35	Resíduo	-	0,05	0,05	0,00

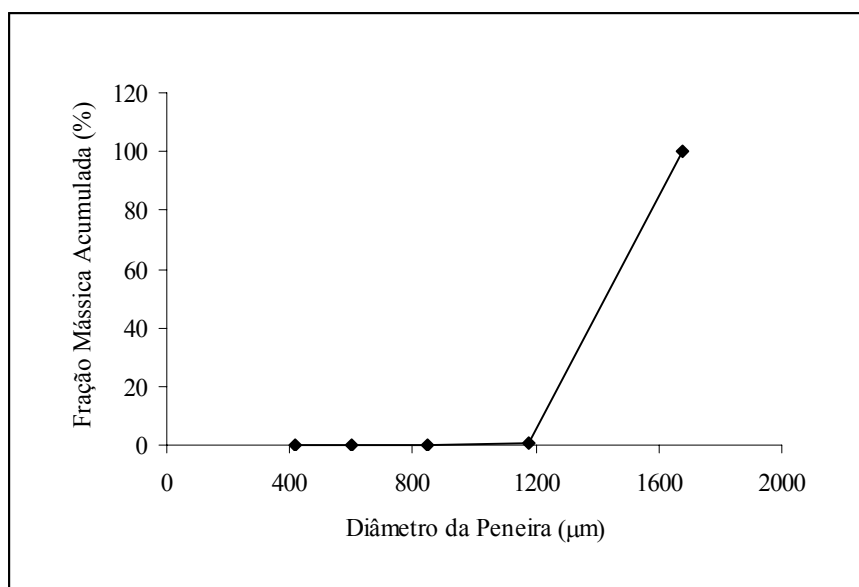


Figura A.1 – Fração Mássica Acumulada em Função do Diâmetro da Peneira
($\bar{d}_P = 1420\mu\text{m}$)

A.2. Distribuição da Amostra de NaCl com $\bar{d}_p = 2020 \mu\text{m}$ Antes da Fluidização

Tabela A.2 - Distribuição Granulométrica ($M_T = 105,40\text{g}$)

Peneiras Padrão Tyler	$d_{\text{peneira}} (\mu\text{m})$	$\bar{d}_{p_i} (\mu\text{m})$	Massa Retida entre Duas Peneiras (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+8	2380	-	-	-	100
-8 + 10	1680	2030	104,66	99,30	0,70
-10 +14	1180	1430	0,66	0,63	0,08
-14+20	850	1015	0,01	0,01	0,07
-20+28	600	725	0,05	0,05	0,02
-28	Resíduo	-	0,02	0,02	0,00

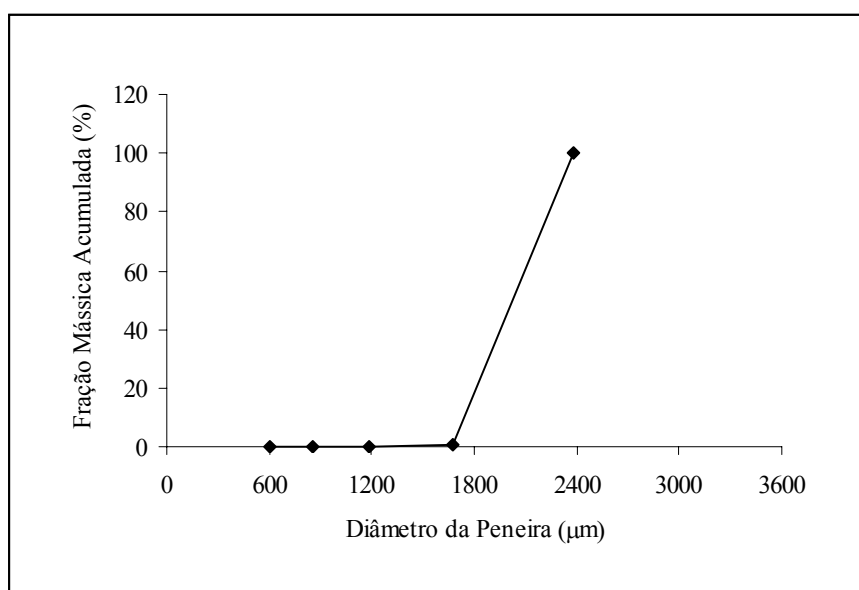


Figura A.2 – Fração Mássica Acumulada em Função do Diâmetro da Peneira ($\bar{d}_p = 2020 \mu\text{m}$)

A.3. Distribuição da Amostra de NaCl com $\bar{d}_p = 2860\mu\text{m}$ Antes da Fluidização

Tabela A.3 - Distribuição Granulométrica ($M_T = 103,51\text{g}$)

Peneiras Padrão Tyler	$d_{\text{peneira}} (\mu\text{m})$	$\bar{d}_{p_i} (\mu\text{m})$	Massa Retida entre Duas Peneiras (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+6	3360	-	-	-	100
-6 + 8	2380	2870	102,56	99,10	0,90
-8 +10	1680	2030	0,87	0,84	0,06
-10 +14	1180	1430	0,01	0,01	0,05
-14 + 20	850	1015	0,02	0,02	0,03
- 20	Resíduo	-	0,03	0,03	0,00

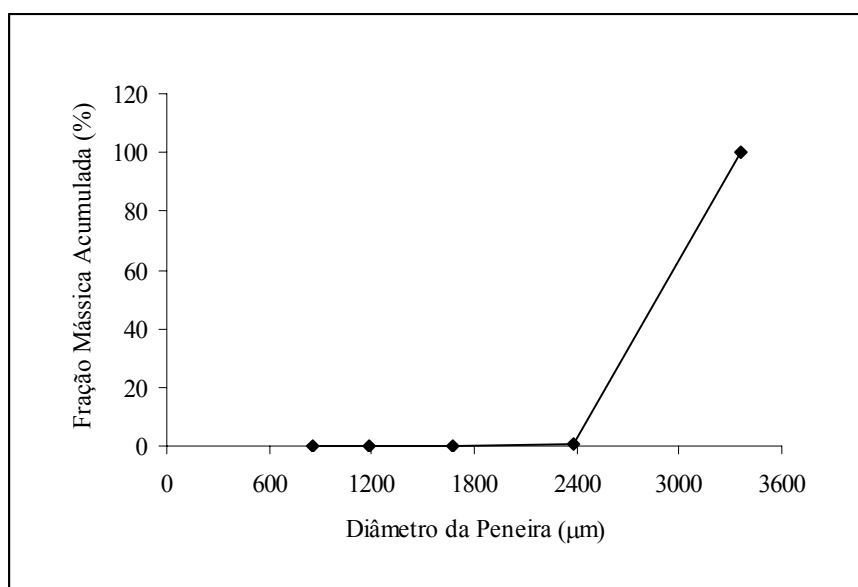


Figura A.3 – Fração Mássica Acumulada em Função do Diâmetro da Peneira ($\bar{d}_p = 2860\mu\text{m}$)

ANEXO B: Resultados Obtidos Através do Planejamento Experimental

B.1: 1º Ensaio do Planejamento: $\bar{d}_p = 1420 \mu\text{m}$; $t = 300\text{s}$; $U = 1,25\text{m/s}$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 24,9^\circ\text{C}$; $UR = 44\%$

Termohygrometro: $T_{\text{Interna}} = 25^\circ\text{C}$; $UR = 44\%$; $T_{\text{Externa}} = 24,5^\circ\text{C}$

Massa inserida no leito = 1200,10g

Massa retirada do leito = 1195,90g

Material arrastado e coletado = 0,88g

Tabela B.1 - Distribuição granulométrica antes e após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{\text{peneira}} (\mu\text{m})$	$\bar{d}_{Pi} (\mu\text{m})$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{inicial}} = 1420 \mu\text{m}$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{final}} = 1416 \mu\text{m}$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+10	1680	-	-	-	100	-	-	100
-10 +14	1180	1430	101,38	99,12	0,88	1176,94	98,41	1,59
-14+20	850	1015	0,82	0,80	0,08	17,80	1,49	0,10
-20+28	600	725	0,03	0,03	0,05	0,13	0,01	0,09
-28+35	420	510	0,00	0,00	0,05	0,56	0,05	0,04
- 35	Resíduo	-	0,05	0,05	0,00	0,47	0,04	0,00

Tabela B.2 – Resultados obtidos a partir da metodologia experimental

$M_i (\text{g})$	$M_m (\text{g})$	$M_d (\text{g})$	$\xi^+ (\%)$	$\xi^- (\%)$	$H_L (\%)$
1200,10	1176,94	18,96	1,92	1,58	0,35

B.1: 2º Ensaio do Planejamento: $\bar{d}_p = 2860 \mu\text{m}$; $t = 300\text{s}$; $U = 1,25\text{m/s}$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 27,10^\circ\text{C}$; $UR = 38,70\%$

Termohygrometro: $T_{\text{Interna}} = 26,30^\circ\text{C}$; $UR = 40\%$; $T_{\text{Externa}} = 25,40^\circ\text{C}$

Massa inserida no leito = 1200,10g

Massa retirada do leito = 1195,63g

Material arrastado e coletado = 0,88g

Tabela B.2 - Distribuição granulométrica antes e após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{\text{peneira}} (\mu\text{m})$	$\bar{d}_{Pi} (\mu\text{m})$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{inicial}} = 2860 \mu\text{m}$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{final}} = 2856 \mu\text{m}$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+ 6	3360	-	-	-	100	-	-	100
-6 + 8	2380	2870	102,56	99,10	0,90	1155,71	96,66	3,34
-8 +10	1680	2030	0,87	0,84	0,06	38,61	3,23	0,11
-10 +14	1180	1430	0,01	0,01	0,05	0,56	0,05	0,06
-14 + 20	850	1015	0,02	0,02	0,03	0,26	0,02	0,04
- 20	Resíduo	-	0,03	0,03	0,00	0,49	0,04	0,00

Tabela B.3 - Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

$M_i (\text{g})$	$M_m (\text{g})$	$M_d (\text{g})$	$\xi^+ (\%)$	$\xi^- (\%)$	$H_L (\%)$
1200,10	1155,71	40,51	3,70	3,38	0,32

B.2: 3º Ensaio do Planejamento: ; $\bar{d}_p = 1420 \mu m$; $t = 1800s$; $U = 1,25m/s$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 23,5^\circ C$; $UR = 46,80\%$

Termohigrometro: $T_{Interna} = 24,50^\circ C$; $UR = 38\%$; $T_{Externa} = 23,80^\circ C$

Massa inserida no leito = 1200,08g

Massa retirada do leito = 1194,45g

Material arrastado e coletado = 3,28g

Tabela B.4 - Distribuição granulométrica antes e após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{peneira} (\mu m)$	$\bar{d}_{Pi} (\mu m)$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{inicial} = 1420 \mu m$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{final} = 1416 \mu m$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+10	1680	-	-	-	100	-	-	100
-10 +14	1180	1430	101,38	99,12	0,88	1172,16	98,13	1,87
-14+20	850	1015	0,82	0,80	0,08	20,46	1,71	0,16
-20+28	600	725	0,03	0,03	0,05	0,19	0,02	0,14
-28+35	420	510	0,00	0,00	0,05	1,17	0,10	0,04
- 35	Resíduo	-	0,05	0,05	0,00	0,47	0,04	0,00

Tabela B.5 - Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

M_i (g)	M_m (g)	M_d (g)	ξ^+ (%)	ξ^- (%)	H_L (%)
1200,12	1172,16	25,57	2,32	2,13	0,19

B.3: 4º Ensaio do Pl anejamento: $\bar{d}_p = 2860 \mu m$; $t = 1800s$; $U = 1,25m/s$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 26,40 \text{ }^\circ C$; $UR = 40,60\%$

Termohygrometro: $T_{Interna} = 25,10 - 25,30 \text{ }^\circ C$; $UR = 38\%$; $T_{Externa} = 25,20 - 27,70^\circ C$

Massa inserida no leito = 1200,09g

Massa retirada do leito = 1197,71g

Material arrastado e coletado = 0,68g

Tabela B.5 - Distribuição granulométrica antes e após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{peneira} (\mu m)$	$\bar{d}_{Pi} (\mu m)$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{inicial} = 2860 \mu m$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{final} = 2822 \mu m$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+ 6	3360	-	-	-	100	-	-	100
-6 + 8	2380	2870	102,56	99,10	0,90	1155,26	96,46	3,54
-8 +10	1680	2030	0,87	0,84	0,06	41,05	3,42	0,12
-10 +14	1180	1430	0,01	0,01	0,05	0,44	0,04	0,08
-14 + 20	850	1015	0,02	0,02	0,03	0,29	0,02	0,06
- 20	Resíduo	-	0,03	0,03	0,00	0,67	0,06	0,00

Tabela B.6 - Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

M_i (g)	M_m (g)	M_d (g)	ξ^+ (%)	ξ^- (%)	H_L (%)
1200,09	1155,26	43,13	3,74	3,60	0,15

B.4: 5º Ensaio do Planejamento: $\bar{d}_p = 1420 \mu\text{m}$; $t = 300\text{s}$; $U = 2,50\text{m/s}$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 25,20^\circ\text{C}$; $UR = 42,0\%$

Termohigrometro: $T_{\text{Interna}} = 23,90^\circ\text{C}$; $UR = 42\%$; $T_{\text{Externa}} = 23,10 - 23,30^\circ\text{C}$

Massa inserida no leito = 1200,06g

Massa retirada do leito = 1192,06g

Material arrastado e coletado = 5,32g

Tabela B.7 - Distribuição granulométrica antes e após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{\text{peneira}} (\mu\text{m})$	$\bar{d}_{Pi} (\mu\text{m})$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{inicial}} = 1420 \mu\text{m}$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{final}} = 1412 \mu\text{m}$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+10	1680	-	-	-	100	-	-	100
-10 +14	1180	1430	101,38	99,12	0,88	1163,76	97,63	2,37
-14+20	850	1015	0,82	0,80	0,08	25,88	2,17	0,20
-20+28	600	725	0,03	0,03	0,05	0,18	0,02	0,19
-28+35	420	510	0,00	0,00	0,05	1,60	0,13	0,05
- 35	Resíduo	-	0,05	0,05	0,00	0,64	0,05	0,00

Tabela B.8 - Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

(g)	M_m (g)	M_d (g)	ξ^+ (%)	ξ^- (%)	H_L (%)
1200,06	1163,76	33,62	3,02	2,81	0,22

B.5: 6º Ensaio do Planejamento: $\bar{d}_p = 2860 \mu\text{m}$; $t = 300\text{s}$; $U = 2,50\text{m/s}$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 25,60^\circ\text{C}$; $UR = 37,30\%$

Termohygrometro: $T_{\text{Interna}} = 25,60^\circ\text{C}$; $UR = 36\%$; $T_{\text{Externa}} = 25,20 - 25,50^\circ\text{C}$

Massa inserida no leito = 1200,10g

Massa retirada do leito = 1188,13g

Material arrastado e coletado = 9,15g

Tabela B.9 - Distribuição granulométrica antes e após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{\text{peneira}} (\mu\text{m})$	$\bar{d}_{Pi} (\mu\text{m})$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{inicial}} = 2860 \mu\text{m}$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{final}} = 2760 \mu\text{m}$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+ 6	3360	-	-	-	100	-	-	100
-6 + 8	2380	2870	102,56	99,10	0,90	1093,22	92,01	7,99
-8 +10	1680	2030	0,87	0,84	0,06	89,29	7,52	0,47
-10 +14	1180	1430	0,01	0,01	0,05	2,75	0,23	0,24
-14 + 20	850	1015	0,02	0,02	0,03	1,13	0,10	0,15
- 20	Resíduo	-	0,03	0,03	0,00	1,74	0,15	0,00

Tabela B.10 - Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

M_i (g)	M_m (g)	M_d (g)	ξ^+ (%)	ξ^- (%)	H_L (%)
1200,10	1093,22	104,08	8,92	8,70	0,25

B.6: 7º Ensaio do Planejamento: $\bar{d}_p = 1420 \mu\text{m}$; $t = 1800\text{s}$; $U = 2,50\text{m/s}$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 27,10^\circ\text{C}$; $UR = 48\%$

Termohygrometro: $T_{\text{Interna}} = 24,60^\circ\text{C}$; $UR = 47\%$; $T_{\text{Externa}} = 25,10 - 26,60^\circ\text{C}$

Massa inserida no leito = 1200,08g

Massa retirada do leito = 1182,68g

Material arrastado e coletado = 14,87g

Tabela B.11 - Distribuição granulométrica antes e após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{\text{peneira}} (\mu\text{m})$	$\bar{d}_{Pi} (\mu\text{m})$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{inicial}} = 1420 \mu\text{m}$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{final}} = 1398 \mu\text{m}$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+10	1680	-	-	-	100	-	-	100
-10 +14	1180	1430	101,38	99,12	0,88	1145,90	96,89	3,11
-14+20	850	1015	0,82	0,80	0,08	29,39	2,49	0,62
-20+28	600	725	0,03	0,03	0,05	0,58	0,05	0,58
-28+35	420	510	0,00	0,00	0,05	4,80	0,41	0,17
- 35	Resíduo	-	0,05	0,05	0,00	2,01	0,17	0,00

Tabela B.12 - Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

M_i (g)	M_m (g)	M_d (g)	ξ^+ (%)	ξ^- (%)	H_L (%)
1200,08	1145,90	51,65	4,51	4,31	0,21

B.7: 8º Ensaio do Planejamento: $\bar{d}_p = 2860 \mu\text{m}$; $t = 1800\text{s}$; $U = 2,50\text{m/s}$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 27^\circ\text{C}$; $UR = 37,60\%$

Termohygrometro: $T_{\text{Interna}} = 26,10^\circ\text{C}$; $UR = 40\%$; $T_{\text{Externa}} = 25,30 - 27,80^\circ\text{C}$

Massa inserida no leito = 1200,10g

Massa retirada do leito = 1165,91g

Material arrastado e coletado = 30,86g

Tabela B.13 - Distribuição granulométrica antes e após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{\text{peneira}} (\mu\text{m})$	$\bar{d}_{Pi} (\mu\text{m})$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{inicial}} = 2860 \mu\text{m}$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{final}} = 2692 \mu\text{m}$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+ 6	3360	-	-	-	100	-	-	100
-6 + 8	2380	2870	102,56	99,10	0,90	1033,58	88,65	11,35
-8 +10	1680	2030	0,87	0,84	0,06	114,32	9,81	1,54
-10 +14	1180	1430	0,01	0,01	0,05	9,61	0,82	0,72
-14 + 20	850	1015	0,02	0,02	0,03	4,25	0,36	0,36
- 20	Resíduo	-	0,03	0,03	0,00	4,15	0,36	0,00

Tabela B.14 - Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

$M_i (\text{g})$	$M_m (\text{g})$	$M_d (\text{g})$	$\xi^+ (\%)$	$\xi^- (\%)$	$H_L (\%)$
1200,10	1033,58	163,19	13,87	13,63	0,28

B.8: 9º Ensaio do Planejamento: $\bar{d}_p = 2020 \mu m$; $t = 1050s$; $U = 1,875m/s$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 26,80^\circ C$; $UR = 39,20\%$

Termohygrometro: $T_{Interna} = 26^\circ C$; $UR = 40\%$; $T_{Externa} = 26,70^\circ C$

Massa inserida no leito = 1200,10g

Massa retirada do leito = 1186,53g

Material arrastado e coletado = 11,23g

Tabela B.15 - Distribuição granulométrica antes após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{peneira} (\mu m)$	$\bar{d}_{Pi} (\mu m)$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{inicial} = 2020 \mu m$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{final} = 2000 \mu m$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+8	2380	-	-	-	100	-	-	100
-8 + 10	1680	2030	104,66	99,30	0,70	1159,75	97,74	2,26
-10 +14	1180	1430	0,66	0,63	0,08	23,06	1,94	0,31
-14+20	850	1015	0,01	0,01	0,07	1,37	0,12	0,20
-20+28	600	725	0,05	0,05	0,02	0,36	0,03	0,17
-28	Resíduo	-	0,02	0,02	0,00	1,99	0,17	0,00

Tabela B.16 - Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

$M_i (g)$	$M_m (g)$	$M_d (g)$	$\xi^+ (\%)$	$\xi^- (\%)$	$H_L (\%)$
1200,10	1159,75	37,64	3,36	3,14	0,22

B.9: 10º Ensaio do Planejamento: $\bar{d}_p = 2860 \mu\text{m}$; $t = 300\text{s}$; $U = 1,25\text{m/s}$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 23,50^\circ\text{C}$; $UR = 43,60\%$

Termohygrometro: $T_{\text{Interna}} = 23,90^\circ\text{C}$; $UR = 40\%$; $T_{\text{Externa}} = 23,30^\circ\text{C}$

Massa inserida no leito = 1200,09g

Massa retirada do leito = 1196,68g

Material arrastado e coletado = 0,64g

Tabela B.17 - Distribuição granulométrica antes e após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{\text{peneira}} (\mu\text{m})$	$\bar{d}_{Pi} (\mu\text{m})$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{inicial}} = 2860 \mu\text{m}$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{final}} = 2824 \mu\text{m}$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+ 6	3360	-	-	-	100	-	-	100
-6 + 8	2380	2870	102,56	99,10	0,90	1155,75	96,58	3,42
-8 +10	1680	2030	0,87	0,84	0,06	39,24	3,28	0,14
-10 +14	1180	1430	0,01	0,01	0,05	0,74	0,06	0,08
-14 + 20	850	1015	0,02	0,02	0,03	0,36	0,03	0,05
- 20	Resíduo	-	0,03	0,03	0,00	0,59	0,05	0,00

Tabela B.18 - Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

$M_i (\text{g})$	$M_m (\text{g})$	$M_d (\text{g})$	$\xi^+ (\%)$	$\xi^- (\%)$	$H_L (\%)$
1200,09	1155,75	41,57	3,69	3,41	0,23

B.10: 11º Ensaio do Planejamento: $\bar{d}_p = 1420 \mu\text{m}$; $t = 1800\text{s}$; $U = 1,25\text{m/s}$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 29,20^\circ\text{C}$; $UR = 32,40\%$

Termohygrometro: $T_{\text{Interna}} = 26,40^\circ\text{C}$; $UR = 35\%$; $T_{\text{Externa}} = 25,20 - 26,90^\circ\text{C}$

Massa inserida no leito = 1200,10g

Massa retirada do leito = 1193,37g

Material arrastado e coletado = 0,64g

Tabela B.19 - Distribuição granulométrica antes e após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{\text{peneira}} (\mu\text{m})$	$\bar{d}_{Pi} (\mu\text{m})$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{inicial}} = 1420 \mu\text{m}$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{final}} = 1414 \mu\text{m}$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+10	1680	-	-	-	100	-	-	100
-10 +14	1180	1430	101,38	99,12	0,88	1171,72	98,19	1,81
-14+20	850	1015	0,82	0,80	0,08	18,81	1,58	0,24
-20+28	600	725	0,03	0,03	0,05	0,37	0,03	0,21
-28+35	420	510	0,00	0,00	0,05	1,63	0,14	0,07
- 35	Resíduo	-	0,05	0,05	0,00	0,84	0,07	0,00

Tabela B.20 - Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

$M_i (\text{g})$	$M_m (\text{g})$	$M_d (\text{g})$	$\xi^+ (\%)$	$\xi^- (\%)$	$H_L (\text{g})$
1200,10	1171,72	24,99	2,36	2,09	0,28

B.11: 12º Ensaio do Planejamento: $\bar{d}_p = 2860 \mu\text{m}$; $t=1800\text{s}$; $U = 1,25\text{m/s}$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 26,90^\circ\text{C}$; $UR = 40,20\%$

Termohygrometro: $T_{\text{Interna}} = 25,20^\circ\text{C}$; $UR = 39\%$; $T_{\text{Externa}} = 25,70 - 25,90^\circ\text{C}$

Massa inserida no leito = 1200,07g

Massa retirada do leito = 1196,56g

Material arrastado e coletado = 0,61g

Tabela B.21 - Distribuição granulométrica antes e após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{\text{peneira}} (\mu\text{m})$	$\bar{d}_{Pi} (\mu\text{m})$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{inicial}} = 2860 \mu\text{m}$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{final}} = 2823 \mu\text{m}$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+ 6	3360	-	-	-	100	-	-	100
-6 + 8	2380	2870	102,56	99,10	0,90	1153,49	96,40	3,60
-8 +10	1680	2030	0,87	0,84	0,06	41,71	3,49	0,11
-10 +14	1180	1430	0,01	0,01	0,05	0,51	0,04	0,07
-14 + 20	850	1015	0,02	0,02	0,03	0,28	0,02	0,05
- 20	Resíduo	-	0,03	0,03	0,00	0,57	0,05	0,00

Tabela B.22 - Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

$M_i (\text{g})$	$M_m (\text{g})$	$M_d (\text{g})$	$\xi^+ (\%)$	$\xi^- (\%)$	$H_L (\%)$
1200,07	1153,49	43,46	3,91	3,63	0,29

B.12: 13° Ensaio do Planejamento: $\bar{d}_p = 1420 \mu m$; $t = 300s$; $U = 2,50m/s$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 25,40^\circ C$; $UR = 49,70\%$

Termohygrometro: $T_{Interna} = 27^\circ C$; $UR = 40\%$; $T_{Externa} = 24^\circ C$

Massa inserida no leito = 1200,08g

Massa retirada do leito = 1191,60g

Material arrastado e coletado = 4,92g

Tabela B.23 - Distribuição granulométrica antes e após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{peneira} (\mu m)$	$\bar{d}_{Pi} (\mu m)$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{inicial} = 1420 \mu m$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{final} = 1413 \mu m$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+10	1680	-	-	-	100	-	-	100
-10 +14	1180	1430	101,38	99,12	0,88	1164,37	97,71	2,29
-14+20	850	1015	0,82	0,80	0,08	25,11	2,11	0,18
-20+28	600	725	0,03	0,03	0,05	0,30	0,03	0,15
-28+35	420	510	0,00	0,00	0,05	1,39	0,12	0,04
- 35	Resíduo	-	0,05	0,05	0,00	0,43	0,04	0,00

Tabela B.24 - Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

$M_i (g)$	$M_m (g)$	$M_d (g)$	$\xi^+ (\%)$	$\xi^- (\%)$	$H_L (\%)$
1200,08	1164,37	32,15	2,97	2,68	0,29

B.13: 14º Ensaio do Planejamento: $\bar{d}_p = 2860 \mu\text{m}$; $t = 300\text{s}$; $U = 2,50\text{m/s}$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 25,40^\circ\text{C}$; $UR = 43,70\%$

Termohygrometro: $T_{\text{Interna}} = 23,20^\circ\text{C}$; $UR = 42\%$; $T_{\text{Externa}} = 22,40^\circ\text{C}$

Massa inserida no leito = 1200,10g

Massa retirada do leito = 1186,11g

Material arrastado e coletado = 8,62g

Tabela B.25 - Distribuição granulométrica antes e após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{\text{peneira}} (\mu\text{m})$	$\bar{d}_{Pi} (\mu\text{m})$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}_{p_{\text{inicial}}} = 2860 \mu\text{m}$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}_{p_{\text{final}}} = 2764 \mu\text{m}$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+ 6	3360	-	-	-	100	-	-	100
-6 + 8	2380	2870	102,56	99,10	0,90	1094,50	92,28	7,72
-8 +10	1680	2030	0,87	0,84	0,06	86,09	7,26	0,47
-10 +14	1180	1430	0,01	0,01	0,05	2,46	0,21	0,26
-14 + 20	850	1015	0,02	0,02	0,03	1,50	0,13	0,13
- 20	Resíduo	-	0,03	0,03	0,00	1,56	0,13	0,00

Tabela B.26 - Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

$M_i (\text{g})$	$M_m (\text{g})$	$M_d (\text{g})$	$\xi^+ (\%)$	$\xi^- (\%)$	$H_L (\%)$
1200,10	1094,50	100,23	8,81	8,38	0,46

B.14: 15° Ensaio do Planejamento: $\bar{d}_p = 1420 \mu m$; $t = 1800s$; $U = 2,50m/s$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 25,40^\circ C$; $UR = 47,60\%$

Termohygrometro: $T_{Interna} = 25,60^\circ C$; $UR = 35\%$; $T_{Externa} = 26,40^\circ C$

Massa inserida no leito = 1200,09g

Massa retirada do leito = 1181,72g

Material arrastado e coletado = 15,26g

Tabela B.27 - Distribuição granulométrica antes e após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{peneira} (\mu m)$	$\bar{d}_{Pi} (\mu m)$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{inicial} = 1420 \mu m$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{final} = 1400 \mu m$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+10	1680	-	-	-	100	-	-	100
-10 +14	1180	1430	101,38	99,12	0,88	1145,08	96,90	3,10
-14+20	850	1015	0,82	0,80	0,08	28,97	2,45	0,65
-20+28	600	725	0,03	0,03	0,05	0,87	0,07	0,58
-28+35	420	510	0,00	0,00	0,05	6,24	0,53	0,05
- 35	Resíduo	-	0,05	0,05	0,00	0,56	0,05	0,00

Tabela B.28 - Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

$M_i (g)$	$M_m (g)$	M_d	$\xi^+ (\%)$	$\xi^- (\%)$	$H_L (\%)$
1200,09	1145,08	51,90	4,58	4,33	0,26

B.15: 16° Ensaio do Planejamento: $\bar{d}_p = 2860 \mu\text{m}$; $t = 1800\text{s}$; $U = 2,50\text{m/s}$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 26,16^\circ\text{C}$; $UR = 41,70\%$

Termohygrometro: $T_{\text{Interna}} = 23,50^\circ\text{C}$; $UR = 46\%$; $T_{\text{Externa}} = 25,40^\circ\text{C}$

Massa inserida no leito = 1200,09g

Massa retirada do leito = 1185,08g

Material arrastado e coletado = 29,96g

Tabela B.29 - Distribuição granulométrica antes e após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{\text{peneira}} (\mu\text{m})$	$\bar{d}_{Pi} (\mu\text{m})$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{inicial}} = 2860 \mu\text{m}$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{final}} = 2704 \mu\text{m}$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+ 6	3360	-	-	-	100	-	-	100
-6 + 8	2380	2870	102,56	99,10	0,90	1033,08	88,54	11,46
-8 +10	1680	2030	0,87	0,84	0,06	121,22	10,39	1,07
-10 +14	1180	1430	0,01	0,01	0,05	6,14	0,53	0,55
-14 + 20	850	1015	0,02	0,02	0,03	3,47	0,30	0,25
- 20	Resíduo	-	0,03	0,03	0,00	2,91	0,25	0,00

Tabela B.30 - Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

$M_i (\text{g})$	$M_m (\text{g})$	$M_d (\text{g})$	$\xi^+ (\%)$	$\xi^- (\%)$	$H_L (\%)$
1200,09	1033,08	163,70	13,91	13,67	0,27

B.16: 17º Ensaio do Planejamento: $\bar{d}_p = 1420 \mu\text{m}$; $t = 30\text{s}$; $U = 1,25\text{m/s}$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 24,20 \text{ }^\circ\text{C}$; $UR = 45 \%$

Termohygrometro: $T_{\text{Interna}} = 23,90 \text{ }^\circ\text{C}$; $UR = 41\%$; $T_{\text{Externa}} = 24^\circ\text{C}$

Massa inserida no leito = 1200,10g

Massa retirada do leito = 1195,42g

Material arrastado e coletado = 0,92g

Tabela B.31 - Distribuição granulométrica antes e após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{\text{peneira}} (\mu\text{m})$	$\bar{d}_{Pi} (\mu\text{m})$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{inicial}} = 1420 \mu\text{m}$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{final}} = 1418 \mu\text{m}$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+10	1680	-	-	-	100	-	-	100
-10 +14	1180	1430	101,38	99,12	0,88	1176,43	98,41	1,59
-14+20	850	1015	0,82	0,80	0,08	17,51	1,46	0,12
-20+28	600	725	0,03	0,03	0,05	0,16	0,01	0,11
-28+35	420	510	0,00	0,00	0,05	0,84	0,07	0,04
- 35	Resíduo	-	0,05	0,05	0,00	0,48	0,04	0,00

Tabela B.32 - Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

$M_i (\text{g})$	$M_m (\text{g})$	$M_d (\text{g})$	$\xi^+ (\%)$	$\xi^- (\%)$	$H_L (\%)$
1200,10	1176,43	19,91	1,97	1,66	0,31

B.17: 18° Ensaio do Planejamento: $\bar{d}_p = 2020 \mu\text{m}$; $t = 1050\text{s}$; $U = 1,875\text{m/s}$

Condições CEPAGRI/UNICAMP: $T = 27,02^\circ\text{C}$; $UR = 38,07\%$

Termohygrometro: $T_{\text{Interna}} = 27^\circ\text{C}$; $UR = 40\%$; $T_{\text{Externa}} = 26,20 - 26,70^\circ\text{C}$

Massa inserida no leito = 1200,10g

Massa retirada do leito = 1186,94g

Material arrastado e coletado = 10,86g

Tabela B.33 - Distribuição granulométrica antes e após a passagem pelo leito

Peneiras Padrão Tyler	$d_{\text{peneira}} (\mu\text{m})$	$\bar{d}_{Pi} (\mu\text{m})$	Antes da Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{inicial}} = 2020 \mu\text{m}$)			Após a Passagem pelo Leito ($\bar{d}p_{\text{final}} = 2000 \mu\text{m}$)		
			Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)	Massa Retida entre Duas Peneira (g)	Fração Mássica Retida (%)	Fração Mássica Acumulada (%)
+8	2380	-	-	-	100	-	-	100
-8 + 10	1680	2030	104,66	99,30	0,70	1159,95	97,73	2,27
-10 +14	1180	1430	0,66	0,63	0,08	23,19	1,95	0,32
-14+20	850	1015	0,01	0,01	0,07	1,38	0,12	0,20
-20+28	600	725	0,05	0,05	0,02	0,38	0,03	0,17
-28	Resíduo	-	0,02	0,02	0,00	2,04	0,17	0,00

Tabela B.34 - Resultados obtidos a partir da metodologia aplicada

$M_i (\text{g})$	$M_m (\text{g})$	$M_d (\text{g})$	$\xi^+ (\%)$	$\xi^- (\%)$	$H_L (\%)$
1200,10	1159,95	37,85	3,34	3,16	0,20